



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TRABAJO DE FIN DE GRADO

Grado en Ingeniería Mecánica

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL MEDIANTE TÉCNICAS ÓPTICAS DE SPRAYS EN COMBUSTIÓN CON MEZCLAS DE COMBUSTIBLES GASOLINA Y DIÉSEL

Autor:

Pablo Escobedo Carbonell

Tutor:

José Vicente Pastor Soriano

2016 – 2017

RESUMEN

Durante los últimos años las normativas anticontaminación, cada vez más restrictivas, han centrado las investigaciones sobre Motores de Combustión Interna Alternativos en la reducción de las emisiones. Una de las estrategias que ha aparecido recientemente ha sido la combustión *dual fuel*, que ha demostrado ser útil en la reducción de NOx y hollín. No obstante, las técnicas habituales de *dual fuel* suelen emplear dos inyectores, uno para cada combustible, algo que aumenta la complejidad física y de calibración. Por ello son varias las investigaciones que se centran en las ventajas que puede suponer la utilización de un único inyector.

En este marco se sitúa el presente trabajo que, pretende, mediante el uso de técnicas de extinción de luz y de medida de OH*, conocer el comportamiento de diferentes sprays en combustión. Estos sprays utilizan combustibles basados en mezclas de gasolina y diesel, y la combustión tiene lugar en un motor de encendido por compresión. Un motor, que ha sido adaptado para el uso de técnicas ópticas pero que permite simular las condiciones termodinámicas que se tienen en el interior de un motor de combustión real.

Se han obtenido resultados para todas las condiciones y mezclas establecidas que han permitido establecer comparaciones. Estos análisis muestran las ventajas o desventajas que supone la combustión en cada punto de operación.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer al CMT-Motores térmicos la posibilidad que me han brindado al realizar este TFG. Sobre todo, al equipo de técnicas ópticas, que me ha permitido aprender y disfrutar tanto. Mención especial para José Vicente y Mattia, que han estado ayudándome y enseñándome durante este tiempo.

Agradecer a la Universidad Politécnica de Valencia la formación recibida, que me ha permitido ir más allá de las clases teóricas.

A mis compañeros de carrera, que me han acompañado desde el primer día en los trabajos, en las noches de estudio y en las de ocio.

A mis amigos, que han estado ahí siempre y que por muy lejos que podamos acabar unos de otros espero tener siempre la oportunidad de juntarme con ellos.

A un nuevo grupo de amigos que este año me ha quitado tanto tiempo, así como dado tantas alegrías.

A mi familia, porque por muy lejos que estemos algunos, sé que siempre habéis estado ahí. En especial a mis padres, que han sabido ayudarme a seguir el camino que he escogido en la vida, aunque en ocasiones me costara verlo.

Muchas gracias a todos.

ÍNDICE

RESUMEN	3
AGRADECIMIENTOS.....	5
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Motivación	11
1.2. Antecedentes	12
1.3. Objetivo del proyecto.....	13
1.4. Estructura y desarrollo del trabajo.....	14
2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA	15
2.1. Introducción	17
2.2. Características del spray.....	19
2.3. Características de la combustión	20
2.3.1. MEC Diésel.....	20
2.3.2. MEP Gasolina.....	21
2.4. Técnicas de visualización.....	23
2.4.1. Extinción de hollín	24
2.4.2. Medida del radical OH*.....	25
3. MATERIALES	27
3.1. Introducción	29
3.2. Motor óptico	30
3.2.1. Motor térmico	31
3.2.2. Circuitos de presión y acondicionamiento	32
3.2.3. Sistema de inyección	32
3.2.4. Sistema de medida, control y adquisición de datos.....	33
3.3. Equipos ópticos	34
3.3.1. Fuente de luz-LED.....	34
3.3.2. Cámaras rápidas	35
3.3.3. Instrumentación óptica	35
3.4. Combustibles.....	36
4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	37
4.1. Introducción	39

4.2.	Matriz de ensayos y procedimiento experimental	40
4.3.	Técnicas de visualización en MCI – Técnicas ópticas	41
4.3.1.	Extinción de hollín	42
4.3.2.	<i>Lift off length</i>	43
4.4.	Procesado de imágenes	44
4.4.1.	Obtención del factor KL “Optical thickness”	44
4.4.2.	Obtención del <i>Lift off length</i>	46
5.	RESULTADOS	47
5.1.	Introducción	49
5.2.	Combustión de spray diésel de inyección directa	50
5.2.1.	Generación de hollín	50
5.2.2.	<i>Lift off length</i>	52
5.3.	Combustión de las mezclas	53
5.3.1.	<i>Misfire</i>	53
5.3.2.	Generación de hollín	54
5.3.3.	<i>Lift off length</i>	56
5.4.	Análisis del efecto de las mezclas.....	59
5.4.1.	<i>Misfire</i>	59
5.4.2.	Generación de hollín	60
5.4.3.	<i>Variación de Lift off length</i>	62
6.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	65
7.	BIBLIOGRAFÍA	69
8.	PRESUPUESTO	73
8.1.	Introducción	75
8.2.	Coste de mano de obra	76
8.3.	Coste de material	78
8.4.	Presupuesto total	79
	TABLA DE FIGURAS.....	81

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

La realización de un Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo sintetizar las competencias adquiridas en las enseñanzas del propio grado. De esta forma, se presenta este trabajo, realizado en el instituto CMT-Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia, en el que se pretende caracterizar experimentalmente sprays en combustión de mezclas de combustible mediante técnicas ópticas. La supervisión del mismo corre a cargo del profesor José Vicente Pastor del Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Este documento es necesario para la obtención del Grado en Ingeniería Mecánica en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería del Diseño de la Universidad Politécnica de Valencia.

Desde un punto de vista más general, hace años que las emisiones de los motores de combustión, especialmente aquellos que funcionan con diésel, están en el punto de mira. Esto se debe a que son la mayor fuente de generación de partículas con un alto grado de toxicidad. El aumento de la contaminación, que en muchos casos llega a ser visible en las grandes ciudades, ha dado lugar a la implantación de leyes cada vez más restrictivas, y son estas las que rigen el diseño de los nuevos motores. La ley que rige a nivel europeo los límites es la EURO.

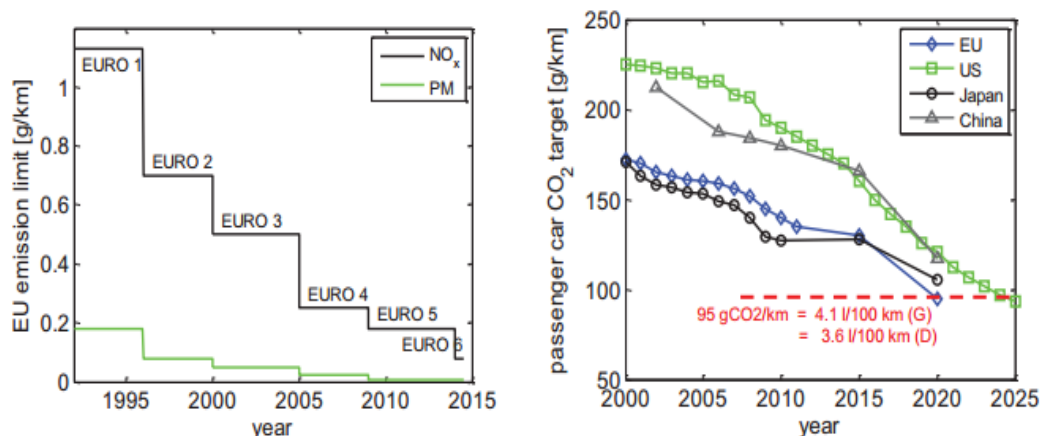


Figura 1.1 Normativa europea de emisiones y objetivos de emisiones a nivel mundial

Debido a esto son muchas las investigaciones que se centran en la búsqueda de combustiones más limpias y eficientes, que permitan la producción de motores con los niveles de potencia requeridos, unos consumos bajos y que se adapten a las normativas impuestas por las distintas autoridades. El instituto CMT-Motores Térmicos de la Universidad Politécnica de Valencia también centra gran parte de sus esfuerzos en este tipo de investigaciones.

1.2. Antecedentes

Los motores de combustión interna alternativos se dividen principalmente en dos ramas, los motores de encendido provocado (MEP) y los motores de encendido por compresión (MEC). Los MEP, producen el encendido de la mezcla de aire y combustible, mediante un aporte de energía externo, generalmente de una chispa. Por otra parte, los motores MEC, también llamados Diésel, producen la combustión a través del autoencendido de la mezcla de aire y combustible cuando se consiguen las condiciones termodinámicas necesarias en el interior de la cámara.

Gracias a la inyección directa, que permite introducir el combustible dentro del cilindro en el instante requerido, se produjo una proliferación rápida de estos motores, pues este tipo de inyección, permite la regulación de la carga mediante el control de la cantidad de combustible inyectado en la cámara de combustión, evitando de esta forma la necesidad de formar una premezcla de aire-combustible. Esto, acompañado de los buenos rendimientos que obtienen este tipo de motores que consiguen consumos menores al resto de alternativas manteniendo unas altas prestaciones, supuso un incremento en el mercado europeo de los motores Diésel, llegando a superar a los motores MEP en nuevas matriculaciones.

Un factor que no se había tenido en cuenta durante años, es el mayor número de emisiones que presentan los MEC respecto a los MEP, algo que ahora, con la implantación de las nuevas normativas anticontaminantes, ha supuesto un importante reto para estos motores, que deben mantener las prestaciones y los bajos consumos que ya tenían y reducir la contaminación que generan para cumplir los límites establecidos. Estas regulaciones afectan a las emisiones de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos sin quemar (HC), partículas (PM) y humos. Para el cumplimiento de la normativa las soluciones que se están aplicando e investigando son generalmente de dos tipos, activas y pasivas. Las activas afectan al diseño del motor e intervienen en el proceso de combustión, como la recirculación de gases de escape (EGR) que lleva años aplicándose, mientras que otras, como la combustión con *dual fuel* o las nuevas estrategias de combustión, están actualmente en investigación. Por otra parte, las soluciones pasivas o técnicas de post-tratamiento, tratan de reducir la polución después de que esta se haya generado, en este caso se habla de trampas de partículas y catalizadores de oxidación y reducción, que están siendo utilizados en los nuevos vehículos para eliminar los NO_x con trampas o inyecciones de urea.

Durante años el proceso de combustión había sido algo abstracto puesto que, al tratarse de algo tan efímero y complejo, no era fácil su análisis. Cabe decir que la estructura de una llama de difusión diésel fue conocida al completo mediante técnicas ópticas hace apenas dos décadas gracias al modelo desarrollado por John E. Dec en "*A Conceptual Model of DI Diesel Combustion Base on Laser-Sheet Imaging*". Por tanto, ha sido en estos años en los que, gracias al uso de estas técnicas, se ha podido estudiar y conocer con exactitud los fenómenos que ocurren dentro de una cámara de combustión, facilitando así la investigación en las soluciones activas, algo realmente difícil antes de los avances en óptica y electrónica.

1.3. Objetivo del proyecto

El presente TFG pretende ampliar el conocimiento sobre los sprays en combustión cuando se inyectan mezclas de diésel y gasolina en condiciones de motor. Para ello se utilizarán técnicas ópticas que permitan adquirir datos experimentales para tal caracterización.

Se analizan con tal fin:

- La combustión del Diesel B0, del que ya se conoce su comportamiento y sirve de punto de partida para las comparaciones.
- Las combustiones de distintas mezclas de diésel y gasolina, observando el comportamiento de estas en cuando a *misfire*, generación de hollín y *lift-off length*.
- La relación de todos los procesos de combustión para establecer tendencias y comportamientos.

Se quieren recoger las ventajas que presenta este tipo de combustión, pero sobretodo comprobar su viabilidad a través de los problemas que presenta.

1.4. Estructura y desarrollo del trabajo

Para la redacción de este trabajo se siguen las líneas generales de todo trabajo experimental que se presenta.

Después de la “Introducción”, en el punto 2, “Contextualización del problema”, se define un marco teórico en el que se establece el punto de partida describiendo los análisis que han llevado a este trabajo, el comportamiento de los sprays y de la combustión de los dos combustibles a analizar. También se describirán las distintas técnicas ópticas utilizadas en el análisis experimental.

Los puntos 3 y 4, “Materiales” y “Metodología experimental”, describen las herramientas empleadas en este proyecto y los métodos necesarios para obtener todos los datos experimentales de los que consta este trabajo, utilizando los materiales requeridos.

Seguidamente, en el punto 5, “Resultados”, los datos obtenidos se agrupan en dos partes: la primera, analiza tanto el hollín y el *lift-off length* de la combustión del diésel, como estas características junto a la posible presencia de *misfire* de las mezclas. En la segunda parte, se pondrán en común todas estas características para poder observar las relaciones que se establecen entre las distintas mezclas y, además, partiendo del diésel, se establecen tendencias y posibles ventajas del uso de las mezclas. A continuación, en el punto 6, “Conclusiones y trabajos futuros”, se relacionan los resultados y análisis obtenidos con los objetivos del trabajo definidos, además de valorar las opciones de futuro que estos estudios presentan.

Finalmente, en los puntos 7 y 8, aparece la recopilación bibliográfica de todos los documentos utilizados a la hora de realizar este trabajo y el presupuesto del mismo que agrupa todos los presupuestos parciales, con el fin de justificar el presupuesto final.

2. CONTEXTUALIZACIÓN DEL PROBLEMA

2. Contextualización de problema

2.1. Introducción

Durante los últimos años, el problema de los contaminantes que emiten los motores ha centrado las investigaciones en cómo reducirlos y, para ello, como ya se ha enunciado, existen dos tipos de soluciones, las que tratan los contaminantes a la salida del motor y las que se centran en el propio diseño del motor, siendo estas últimas las propias de este estudio.

Los motores de encendido por compresión presentan grandes ventajas en cuanto a su rendimiento. No obstante, las emisiones suponen un gran problema, principalmente los NO_x y las partículas. Al tratarse de motores que no suelen operar en regímenes estacionarios, abarcan una gran zona de trabajo, por lo que esa reducción de los contaminantes no puede focalizarse únicamente en un punto de operación. La distribución de hollín y NO_x en función del dosado relativo y la temperatura se puede observar en la Figura 2.1. De esta forma, se comprenden las tendencias en cuanto a combustión para reducir emisiones como son trabajar con dosados y temperaturas bajas.

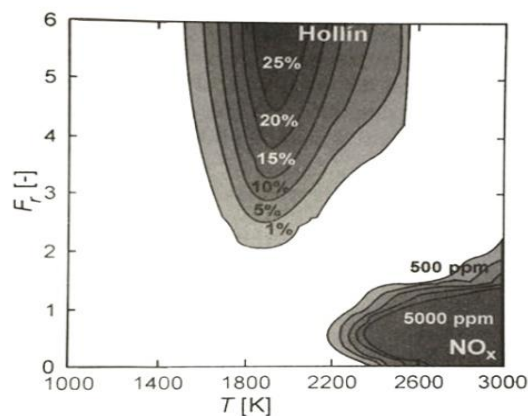


Figura 2.1 Mapa de la generación de hollín y NO_x en función del dosado relativo (F_r) y la temperatura.

Una de las principales soluciones es la recirculación de gases o EGR en la que, los gases de escape son introducidos de nuevo en el cilindro con el fin de reducir los NO_x por vía térmica ya que, además de conseguir un calor específico mayor que el del aire, la velocidad de llama será más reducida consiguiendo así, una temperatura menor. Además, estas ventajas se pueden acentuar con la refrigeración de estos gases antes de ser introducidos en la cámara de combustión. Por otra parte, el principal inconveniente que presenta el EGR, es el aumento de las emisiones de partículas e hidrocarburos sin quemar, especialmente en altos grados de carga.

Siguiendo esta tendencia de evitar altas temperaturas de llama, aparece la combustión a baja temperatura que, combinada con la recirculación de gases, pretende quemar gran parte del combustible en la etapa premezclada de la llama, manteniendo la temperatura máxima alejada de la región de formación de NO_x. Esto se consigue con dosados máximos, bajos en el

interior del spray y con bajas temperaturas del aire en la cámara de combustión, evitando así, además de la zona de los NOX, la zona de formación de hollín. Esta solución, sin embargo, presenta un problema al reducir la eficiencia de la combustión y, por consiguiente, el rendimiento de todo el ciclo.

También existe una solución, utilizada en los motores de combustión por compresión, que consiste en la estratificación de la mezcla, es decir, trabajar con mezclas no homogéneas. Para ello es muy importante el diseño de la cámara de combustión, así como la posición del inyector. Ambas deben introducir el combustible hacia una pequeña zona de combustión, consiguiendo en esta, el dosado necesario para el quemado, pero con un dosado global bajo. Se consigue así aumentar el rendimiento del ciclo ya que, reduce las pérdidas sobretodo de bombeo y de calor. Este tipo de soluciones debe ser regulado correctamente, o de lo contrario podría generar el apagado de llama o *misfire*.

Las últimas tendencias de investigación se centran en combustiones a baja temperatura, que suponen una gran mejora en cuanto a emisiones contaminantes. Una de estas estrategias de combustión es la inyección mixta o *dual fuel* que produce una combustión utilizando un combustible muy reactivo (gasolina) y otro menos (diésel). Esta, ha demostrado ser una buena solución en cuanto a reducción de emisiones ya que, aprovechan los buenos rendimientos de los motores MEC reduciendo los contaminantes a través de combustiones menos directas y con más fases de premezcla. La aplicación del *dual fuel* puede ser de varias formas, tanto la utilización una mezcla con una proporción fija de cada combustible intentando, de esta forma, aprovechar las ventajas de ambos tipos de combustión en un motor de encendido por compresión, como las técnicas de RCCI. En la combustión Reactivity Controlled Compression Ignition se introduce un combustible poco reactivo en el interior del cilindro para conseguir una mezcla apropiada inyectando el combustible más reactivo, antes de que el otro inicie el encendido. De esta forma se tiene un control apropiado de la combustión con el fin de conseguir bajas temperaturas de llama, reduciendo así los contaminantes.

Tenemos, por tanto, varias soluciones que presentan grandes ventajas, pero también algunos problemas. Todas ellas buscan una reducción de las emisiones, principalmente de NOx y hollín, sin perder rendimiento, siendo este uno de los principales retos de investigación en cuanto a motores de combustión interna alternativos.

2.2. Características del spray

En función de la ubicación en la que se realiza la inyección se tienen varios tipos de motor: los de inyección directa, en los que el combustible es introducido directamente al cilindro y los de inyección indirecta, en los que se tiene una precámara para tal fin. Son los primeros, los que, gracias a las mejoras en los sistemas de inyección y su mayor rendimiento, son objeto de más estudio.

El spray o chorro es producido al introducir un flujo, combustible en este caso, por un orificio de inyección, produciéndose entonces, gracias a la viscosidad, un intercambio de cantidad de movimiento entre el flujo y el aire. Ese intercambio genera un frenado y ensanchamiento del chorro, así como el englobamiento de aire y la mezcla del combustible.

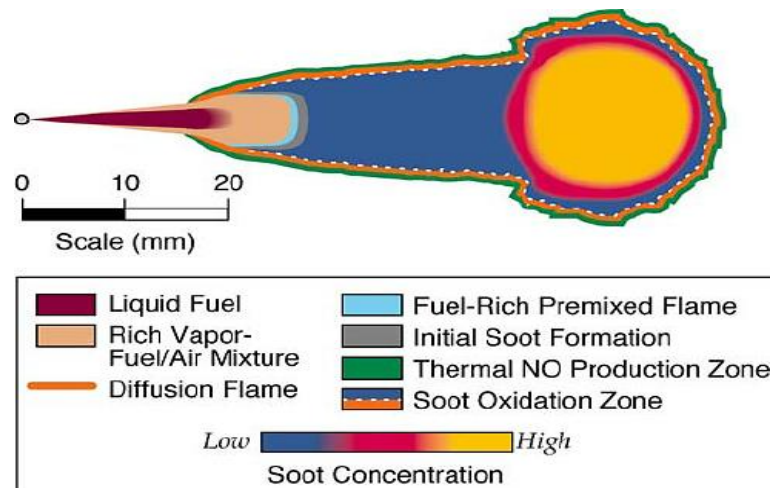


Figura 2.2 Esquema de la forma y zonas de un chorro diésel definido por Dec.

Cuando se analiza una inyección directa y se estabiliza el spray se tiene una estructura muy clara que fue caracterizada por Dec, como se ve en la Figura 2.2. Se observa una primera zona en contacto con la tobera, con el comportamiento de un chorro inerte, pues está alejada de la parte reactiva. Es ahí donde se producen los fenómenos anteriormente descritos que forman la mezcla y la longitud de esta parte se conoce como LOL (*lift-off length*). La LOL depende de muchos parámetros como la velocidad de inyección, la temperatura y la densidad; y la cantidad de aire englobado, depende directamente de ella, consiguiendo por tanto que, a mayor longitud, se tenga más aire y, en consecuencia, menor cantidad de hollín. Seguidamente, se tiene una zona de reacción premezclada, donde se quema el oxígeno englobado en la inyección. Por último, la zona en la que la llama adquiere su estructura típica que, en el caso, es la de una llama de difusión, hay una zona interna ocupada por combustible sin quemar y productos parciales de la combustión. Esta zona supone a su vez un depósito de hollín, que se oxida al llegar al frente de llama.

2.3. Características de la combustión

La RAE define la combustión como una reacción química entre el oxígeno y un material oxidable, acompañado de un desprendimiento de energía y que habitualmente se manifiesta por incandescencia o llama. Es ese aporte el que permite a los MCIAs generar potencia, gracias a la transformación del combustible en energía. No obstante, esa reacción puede venir dada de muchas formas ya que, este tipo de motores puede operar con distintos modos de combustión. Se tienen, por tanto, dos grupos fundamentales: los motores de encendido por compresión, también conocidos como Diésel, y los motores de encendido provocado, que habitualmente utilizan gasolina como combustible.

2.3.1. MEC Diésel

Este tipo de motores recibe este nombre porque no requiere del aporte de energía para iniciar el encendido de la mezcla, sino que, es el propio combustible el que, debido a las condiciones dentro de la cámara de combustión, presión y temperatura altas alcanzadas en la fase de compresión, se autoenciende al ser químicamente inestable. Una característica, también particular, de estos motores es el corto tiempo de evaporación y mezcla que tiene el combustible para encenderse, al inyectar muy cerca del PMS (Punto Muerto Superior). Se tiene, por tanto, un proceso de combustión que depende en gran medida de las condiciones de funcionamiento del motor.

El proceso de combustión viene caracterizado en la Figura 2.3 en la que se ven las distintas fases de la combustión, definidas por tres tipos de información: la tasa de liberación de calor, la presión en cámara, y la tasa de inyección.

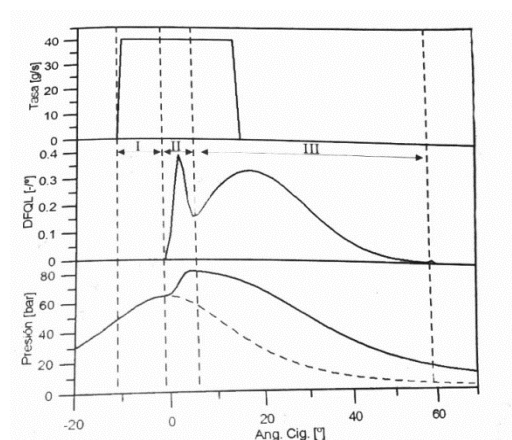


Figura 2.3 Gráficas de tasa de inyección, ratio de calor liberado y presión en el interior del cilindro, en función del ángulo del cigüeñal.

La primera fase, se refiere al retraso del autoencendido. En ella, no se tiene liberación de calor pues ocurre entre el inicio de la inyección y el de la combustión. Es una etapa en la que el spray, al penetrar en un ambiente de alta densidad, se desintegra y se mezcla con el aire, produciendo estos fenómenos, la evaporación del combustible líquido. Estos procesos seguirán durante toda la duración de la inyección. También se pueden diferenciar dos procesos químicos, uno a baja temperatura, en el que la liberación de calor es casi imperceptible y empiezan a parecer los primeros radicales como el OH^* y otro, más exotérmico y a mayor temperatura, que marca el inicio del siguiente paso.

En la segunda fase, tendremos una combustión premezclada que generará una liberación de calor bastante intensa en la que, la mezcla del interior del spray pasa de inerte a reactivo. Se determina por tres fenómenos: la elevada temperatura de la cinética química del autoencendido que aumenta la tasa de consumo de combustible y, con ello, la de liberación de calor; la formación de especies, tanto finales como intermedias que lleva a la aparición de la llama formada por hollín incandescente. Y, por último, el establecimiento de un frente de llama por difusión que caracteriza el resto de la combustión.

Es en ese momento en el que aparece la tercera fase, con una combustión por difusión, que será la que más dure en el tiempo y la que consolide el frente de llama, generando una estructura que se ve en Figura 2.2. Cabe decir que la liberación de calor será más intensa cuanto más rápida sea la mezcla, algo que, es controlado por la cantidad de movimiento que introduce el spray. Una vez cesa la inyección y hasta que se consuma todo el combustible, la tasa de combustión cae y será la turbulencia la que controle el fenómeno de oxidación.

2.3.2.MEP Gasolina

Aunque desde la aparición de la inyección directa existen motores de encendido provocado con un funcionamiento que, modificando el proceso de combustión, difiere mucho del habitual, este tipo de motores, por norma general, siguen funcionando mediante una deflagración premezclada con carga homogénea. En este proceso, un agente externo, generalmente una chispa, da inicio a la combustión, generando un frente de llama muy claro que recorre la cámara de combustión quemando la mezcla de manera uniforme. Este tipo de motores deberán utilizar combustibles con una resistencia a la autoinflamación alta, como en el caso de estudio, en el que se utiliza gasolina.

El proceso de combustión de estos motores se da en un campo de flujo turbulento que se ha generado en la admisión y se va modificando en la compresión. Esta turbulencia tiene una gran influencia, tanto en la estructura como en la propagación de la llama. Mediante técnicas ópticas, se ha podido caracterizar la estructura de la llama en estos motores, viéndose una propagación esférica aunque, este frente será menos claro en función de la vorticidad del flujo. Por otra parte, el estudio de la velocidad de la llama depende, a parte de la posición de la bujía, de la velocidad de combustión laminar y turbulenta. De ambas velocidades, será la última, la más interesante pues es mucho mayor, debido a que la turbulencia viene

acompañada de un aumento de la superficie del frente de llama, así como de un mayor intercambio de calor y masa.

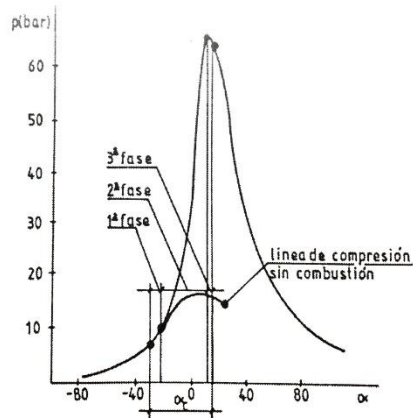


Figura 2.4 Gráfica de la presión en función del ángulo del cigüeñal en el que se indican las fases de combustión para un MEP

FIGURA: Gráfica de la presión en función del ángulo del cigüeñal en el que se indican las fases de combustión para un MEP

La combustión vendrá caracterizada en tres fases, definidas en la Figura 2.4. Primeramente, se tiene el tiempo de retraso que comprende el momento entre la chispa y el inicio del aumento de presión producido por la combustión. Esta parte sigue el comportamiento de la combustión laminar. Como segundo paso, está la fase de rápida combustión en la que es quemado casi todo el combustible rápidamente gracias, mayoritariamente, a la combustión turbulenta, produciendo un aumento drástico de la presión en el cilindro. Por último, la fase de apagado de llama, se inicia en el punto de máxima presión y finaliza al extinguirse completamente la llama que ha tenido un comportamiento laminar.

2.4. Técnicas de visualización

Los procesos físico-químicos que ocurren dentro del cilindro de un motor son realmente complejos y su caracterización teórica ha sido siempre muy difícil. No obstante, la aparición de técnicas ópticas aplicadas a mediciones en MCI, ha permitido un estudio experimental de los parámetros físicos del fluido que se encuentra en el interior de la cámara de combustión.

Las primeras medidas que se hacían mediante técnicas ópticas, se basaban en las variaciones del índice de refracción provocadas por cambios en sus propiedades físicas. Al viajar por un fluido un haz de luz, la intensidad y fase de las ondas, varían en función de las propiedades del flujo. Técnicas de este tipo son la visualización de sombras (*shadowgraphy*), que registra la imagen de un haz colimado después de que este se propague por el espacio o la fotografía *Schlieren*, muy similar a la anterior, pero aplicando un filtro espacial en el plano imagen de la fuente.

Por otra parte, también existen ciertas técnicas, llamadas dispersivas, que iluminan el fluido con láminas de luz, permitiendo obtener la información de cada plano. Estas técnicas pueden ser de tipo elástico o inelástico, en función de si en el proceso se produce la frecuencia de la radiación.

Dentro de las de tipo elástico encontramos la dispersión de *Mie* y la de *Rayleigh*. La primera, se basa en la relación de la luz con las partículas que tienen un tamaño mayor al de su longitud de onda. Las características de la luz que será dispersada se relacionan con la forma, tamaño, índice de refracción y número de partículas dispersoras. Se tienen, entonces, varias técnicas que dependerán de las características anteriores como la visualización con lámina laser, las técnicas de anemometría laser, las de extinción de luz y las de velocimetría de imágenes de partículas. En cuanto a la dispersión de *Rayleigh*, es muy similar a la anterior pero con partículas menores que su longitud de onda, teniendo por tanto, la dificultad de encontrar partículas grandes que distorsionan las medidas.

Por el contrario, las técnicas de dispersión inelástica, se basan en el estudio de los fenómenos de interacción materia-radiación, siendo estos especialmente sensibles a la frecuencia de la radiación y a la composición química de las especies. Dentro de este campo, se tienen técnicas como la espectroscopía Raman espontánea vibracional, la incandescencia y la fluorescencia inducida por láser, las técnicas de espectroscopía de absorción y el trazado de partículas fosforescentes.

También existen otras técnicas, utilizadas en ocasiones para problemas de mecánica de fluidos, pero que no encuentran aplicación en los MCI. Estas son, por ejemplo, la tomografía asistida por ordenador y la resonancia magnética nuclear.

Gracias al uso en conjunto de estas técnicas, se han podido llegar a comprender los fenómenos que tienen lugar en el proceso de combustión de un MCI, caracterizando con cada una, los distintos comportamientos de las llamas, como se observa en la Figura 2.5.

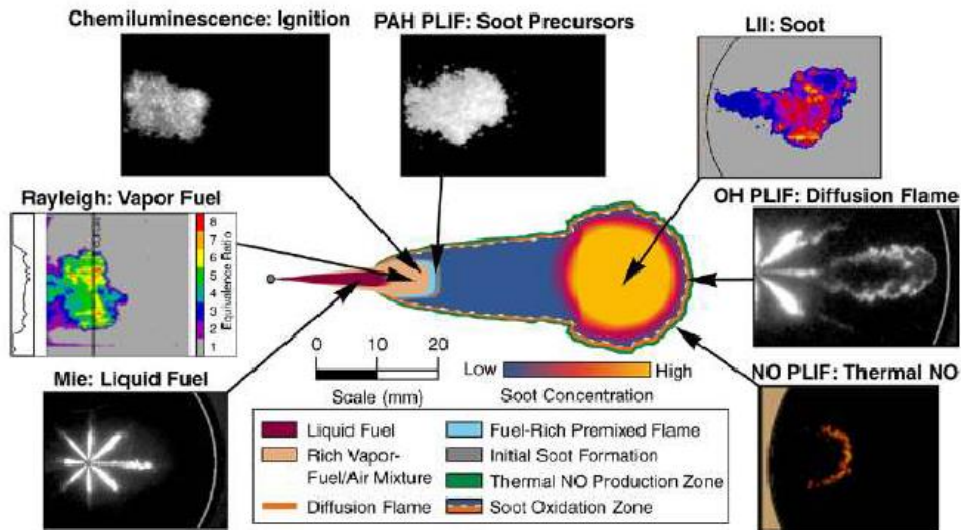


Figura 2.5 Esquema de distintas técnicas ópticas que permiten estudiar las distintas zonas y comportamientos de un spray reactivo.

Cuando se utilizan las técnicas anteriores se requiere, por lo general, un procesado y análisis de los datos obtenidos, tarea simplificada, gracias a los avances computacionales de los últimos tiempos. La mayoría de estos procesados se realizan mediante algoritmos que permiten evitar errores presentes en las imágenes, segmentar la imagen para evaluar zonas de mayor interés y medir diferentes parámetros relevantes de cada estudio.

2.4.1. Extinción de hollín

Dentro de las técnicas de dispersión elástica y, concretamente, en la dispersión *Mie* se habla de las técnicas de extinción de luz. Se fundamentan en la luz que extingue una nube de partículas. Y esta extinción, se compone tanto de la luz dispersada como de la absorbida.

La extinción de cada nube depende de las propiedades de las partículas como son el diámetro, el coeficiente de extinción, el número de densidad y la función de distribución del tamaño de las partículas. En el caso de las partículas de hollín que son las que se estudian en este trabajo, su forma se aproxima a una esfera, de esta forma se podrá decir que la dispersión y la absorción componen la extinción, siendo esto lo que se adquiere mediante las cámaras. Si esta aproximación no se diera se debería realizar un estudio de la dispersión. Se puede obtener un índice de refracción aproximado, que es una aproximación a la refracción de una aglomeración de moléculas de carbono. Estas aproximaciones, introducen errores en los cálculos, pero también los simplifican mucho.

La intensidad I registrada después de que la luz atraviese la nube se obtiene de:

$$\frac{I}{I_0} = \exp(-KL)$$

Donde I_0 es la intensidad transmitida por la fuente de luz, K el coeficiente de extinción para la nube de hollín y L el recorrido óptico de la radiación. El factor KL , definido como densidad óptica, permite tener una medida de la cantidad de hollín presente en la llama, pues es directamente proporcional a la cantidad de partículas una vez se ha definido el índice de refracción.

2.4.2. Medida del radical OH*

El radical OH* aparece en los inicios de la combustión cuando la llama aún no es visualizada, siendo por tanto un precursor de la combustión. En consecuencia, el OH* marca la verdadera posición de una llama difusiva.

Cuando se toma una imagen en luminosidad natural se recoge la emisión de llama en el entero espectro, sin seleccionar ninguna longitud de onda en particular. Por otra parte, es sabido que la molécula del OH* solo emite en una franja espectral, centrada en 310nm. Se requiere del uso de filtro en las cámaras para que estas puedan ver únicamente la franja espectral de interés, visualizando así el OH*.

2. Contextualización de problema

3. MATERIALES

3.1. Introducción

En esta parte del trabajo se recogen los datos, descripciones y características de las distintas herramientas utilizadas a lo largo del trabajo. Se describen por tanto las instalaciones experimentales, que requieren los ensayos realizados en el trabajo, los diferentes equipos ópticos que se utilizan en la adquisición de datos y los combustibles que se requieren.

Los tres conjuntos principales de los materiales que han sido necesarios para los ensayos de los que han sido obtenidos los datos a analizar son el motor óptico, y todos sus sistemas, los equipos ópticos y los combustibles.

3.2. Motor óptico

La instalación utilizada en el presente trabajo es llamada comúnmente *Motor maqueta* y pertenece al instituto CMT-Motores térmicos. Está formado por un motor térmico, de tipo MEC, adaptado para el uso de técnicas ópticas y los equipos auxiliares que son necesarios para controlar las condiciones de trabajo del mismo y adaptarlas a las necesidades establecidas. El motor se puede observar en la Figura3.1.



Figura 3.1 Imagen del Motor maqueta

La denominación de maqueta la recibe por ser un modelo de un MCI tipo MEC que simula los distintos fenómenos que en este se producen, permitiendo su estudio. En esta instalación se pueden aplicar desde las técnicas ópticas más sencillas basadas en la captación de imágenes hasta las más complejas que requieren del uso de láseres. Para ello se realiza un diseño en base a otro motor, modificando principalmente la culata del mismo, y creando en esta varias ventanas que permitan el acceso óptico.

Las ventanas, vistas en la Figura3.2, deben utilizar un material que cumpla ciertos requisitos térmicos, mecánicos, de transmisividad óptica y de coste. Debido a las exigentes condiciones en las que deben trabajar, los materiales que se pueden utilizar son el zafiro y el cuarzo, siendo este último el elegido para este trabajo por las buenas prestaciones que presencia, sumadas a un coste más asequible.

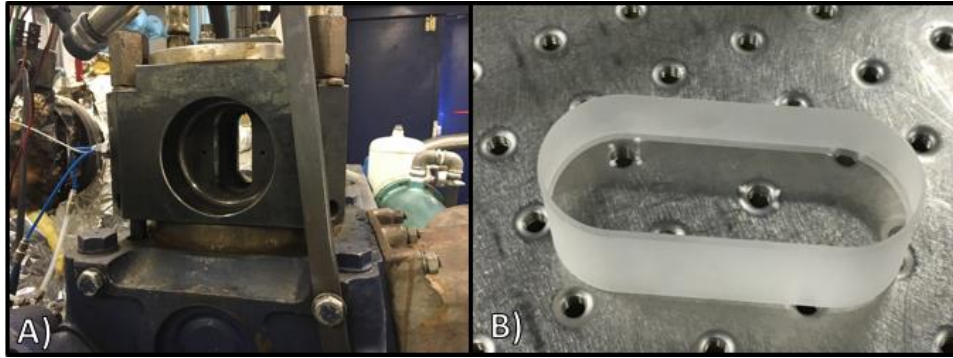


Figura 3.2 A) Culata con accesos ópticos B) Ventana de cuarzo

A pesar de la alta resistencia del material utilizado en las ventanas, estas siempre sufren desgaste y si son sometidas de forma reiterada a los esfuerzos que produce la combustión en el interior del cilindro, sufren un desgaste excesivamente rápido. Como solución se opta por realizar ciclos de inyecciones en los que se hace una inyección cada 30 ciclos, evitando de esta forma también el ensuciado de las ventanas. Debido a esto se debe buscar un aporte de energía externo que permita mantener el régimen de giro del motor estable, para ello, este motor, mientras que otros utilizan frenos eléctricos para mantener el par, utilizará un motor eléctrico que pueda arrastrar el motor térmico.

3.2.1. Motor térmico

La base del Motor maqueta es un motor mono-cilíndrico de tipo diésel de dos tiempos e inyección directa con 3 litros de cilindrada, cuyas características geométricas se recogen en la siguiente tabla:

Características geométricas	
Diámetro cilindro	150 mm
Carrera	170 mm
Carrera efectiva	108 mm
Cilindrada	3000 cm ²
Distancia entre inyector y pistón en PMS	87.8
Ratio de compresión	15.8:1

El proceso de renovación de la carga es asistido por un compresor de lóbulos. Por otra parte, la culata, que es independiente e intercambiable consta en este caso de tres accesos ópticos que equipan unas ventanas con forma ovalada de 30x81x28mm. El régimen de giro escogido para los ensayos es de 500 rpm, una velocidad de giro no demasiado alta que evita posibles problemas por excesivos flujos de aire.

3.2.2. Circuitos de presión y acondicionamiento

Un elemento de gran relevancia en la instalación son los circuitos de presión y acondicionamiento, pues son estos los que permiten controlar los parámetros de funcionamiento y establecer las condiciones que se requieren en el motor. La figura 3.3 muestra un esquema del circuito con sus principales componentes y es importante para la comprensión de los dos modos principales de funcionamiento, un circuito abierto y uno cerrado. El ciclo abierto, que es el utilizado para la obtención de datos del siguiente trabajo, se basa en la toma de aire del ambiente y la expulsión de los gases a la atmósfera. En cuanto al circuito cerrado, su funcionamiento se fundamenta en la recirculación de gases, y es que una vez se ha producido la combustión los gases son enfriados en el intercooler y enviados mediante el compresor a la alimentación, en la que se puede añadir aire o nitrógeno.

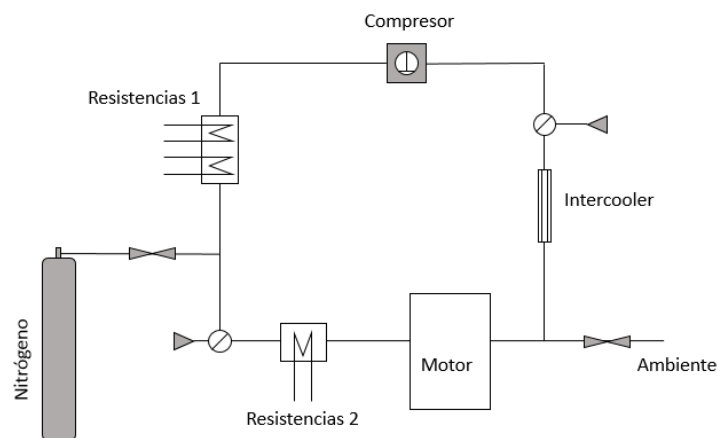


Figura 3.3 Esquema de los circuitos de presión y acondicionamiento principales

Por otra parte, el funcionamiento de los circuitos de acondicionamiento se basa en tres circuitos de control. El primero regula la temperatura del gas en la admisión mediante las resistencias situadas en el circuito de presión. En cuanto a la temperatura del bloque motor, su regulación se realiza mediante acondicionadores que mantendrán las temperaturas del agua y el aceite en los valores óptimos. Por último, para mantener la temperatura del combustible constante, se implanta un sistema de refrigeración por serpentín que adecua la temperatura del retorno de combustible a la del depósito.

3.2.3. Sistema de inyección

El *Motor maqueta* utiliza un sistema de inyección de tipo *common-rail* que permite simular el funcionamiento de un motor de inyección directa, y que es montado en la parte superior de la culata.

El inyector utilizado es un mono-orificio, que permite la generación de un chorro muy claro, algo que ayuda a la adquisición de datos mediante las cámaras.

3.2.4.Sistema de medida, control y adquisición de datos

La función principal del motor es simular unas condiciones para poder obtener datos sobre el comportamiento de diversos factores en estas, para ello debe contar con diversos sistemas que aseguren las condiciones que se desean, así como que permitan conocer ciertos datos de interés.

Se tienen por tanto sistemas de medidas, basados en captadores instalados en varios puntos del banco de ensayos, estos miden:

- Temperatura y presión media de la admisión
- Temperatura y presión media del escape
- Presiones instantáneas de escape y admisión
- Presión instantánea en la cámara de combustión
- Temperatura de combustible
- Presión instantánea de inyección
- Pulso de inyección
- Posición angular cigüeñal
- Régimen de giro del cigüeñal

Por otra parte, se tienen sistemas que permiten el control del banco de ensayo y trabajan conjuntamente con los de medidas de señales. Estos están formados por reguladores PID que controlan los distintos parámetros, y se recogen en el armario de control, la unidad de control de inyección y la caja de sincronización de señales.

Finalmente, el banco de pruebas cuenta con una unidad de adquisición de datos, que permite visualizar y agrupar las señales obtenidas del motor para su análisis.

3.3. Equipos ópticos

El Motor maqueta permite adquirir datos mediante técnicas ópticas a través de sus ventanas, y para cada una de estas técnicas se requiere el uso de diversos materiales que se explican a continuación.

3.3.1. Fuente de luz-LED

A la hora de escoger una fuente de luz apropiada para el cada ensayo es importante valorar varios parámetros, como son la intensidad de la misma y el tipo de fuente. Al ser utilizada para obtener datos de hollín mediante LEI la intensidad es de gran importancia, pues esta marca el punto de saturación, es decir, la intensidad de luz marca tu fondo de escala no pudiendo medir más. El ensayo requiere de una luz difusa, la luz del led debe ser colimada en cierta medida para conseguir iluminar todo el difusor. El LED utilizado aparece en la Figura 3.4.

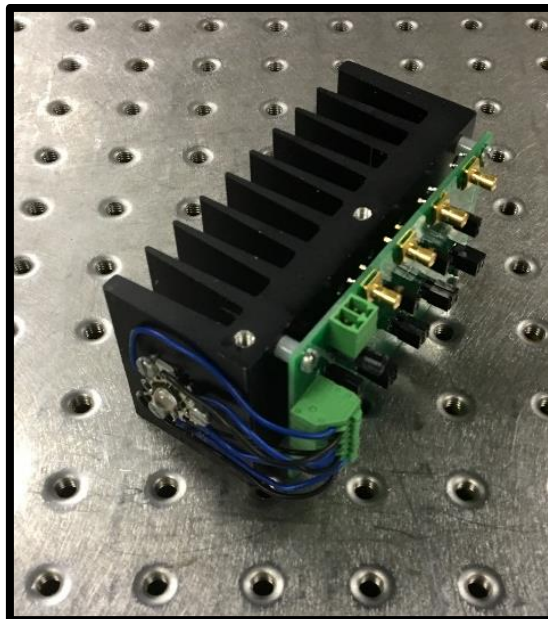


Figura 3.4 Fuente de luz-LED utilizada en los ensayos

En este ensayo, en el que se produce un encendido y apagado de la fuente de luz con una frecuencia relativamente alta, la fuente de luz debe cumplir también con este tipo de requerimiento. El led utilizado va asociado a un disipador de calor, que evita el sobrecalentamiento del mismo debido a las altas intensidades que lleva asociadas.

3.3.2. Cámaras rápidas

En el trabajo se debe obtener dos tipos de informaciones, una debe capturar las imágenes de LEI que permitan conocer la concentración de hollín y otra para realizar las medidas de OH*. El funcionamiento de ambas es muy diferente, pues para las imágenes LEI se busca una cámara que pueda trabajar a muchos fps (*frames per second*), garantizando así una buena resolución temporal. Por otra parte, la medida del OH* es complicada debido a su baja emisividad, necesitando por tanto el uso de cámaras intensificadas, que captan bajas intensidades. Estas cámaras presentan un problema, esa intensificación les impide, en la mayoría de casos, capturar las imágenes de forma rápida. Por tanto, se requiere para la adquisición de los datos necesarios de dos cámaras, una rápida y una intensificada, vistas en la Figura 3.5.

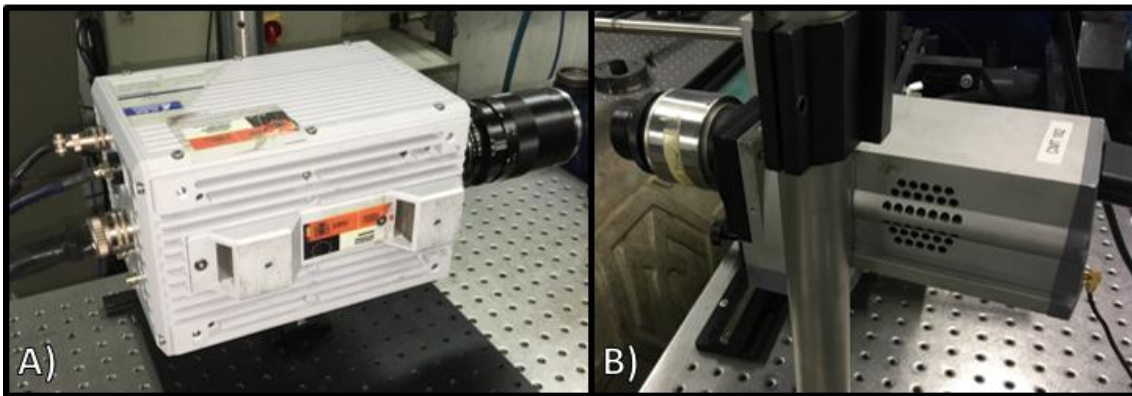


Figura 3.5 A) Cámara rápida Photron B) Cámara intensificada Andor

3.3.3. Instrumentación óptica

A parte de los elementos ópticos más importantes, existen componentes necesarios los ensayos realizados, estos son detallados a continuación:

- Filtros: El uso de filtros permite controlar la información que capta cada cámara, de esta forma en la cámara intensificada se permite adquirir solos los datos del OH*, como en el caso de la cámara rápida, donde el interés real está en capturar la radiación del led, intentado limitar lo máximo posible la producida por la llama.
- Lente Fresnel: La finalidad de la misma es cambiar la dirección de la luz emitida por el led, con el fin de redirigir esta hacia el difusor.
- Difusor: El difusor permite crear un campo de intensidad Lambertina en el que cualquier punto del mismo tenga la misma intensidad.

3.4. Combustibles

Para este trabajo se han utilizado dos combustibles diferentes en tres mezclas. El primero, que actúa de referencia será diésel puro, llamado Diésel B0, y tres mezclas nombradas 3070, 5050 y 7030, indicando los dos primeros números la proporción de gasolina (también comercial) presenten en la misma (30%, 50% y 70%). Las propiedades de los dos combustibles utilizados, diésel B0 y gasolina E10 – 98EN228, se recogen en la siguiente tabla:

Propiedades	Diésel B0	Gasolina E10 – 98EN228
Formula química	$C_{15}H_{31.9}$	$C_{6.43}H_{11.97}O_{0.21}$
Peso molecular	211.9	105.34
%C	86.6	63.5
%H	13.4	13
%O	0	3.5
Densidad(15°) [kg/m ³]	834.7	755
Número de octano experimental	-	103
Número de cetano	53	-
Punto ignición [k]	355	120
Poder calorífico inferior [MJ/kg]	42.97	41.29

4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

4.1. Introducción

Como ya se ha comentado la adquisición de datos mediante técnicas ópticas debe ir acompañada de un procesado de los mismos, con el fin de obtener resultados esclarecedores del comportamiento del motor analizado.

Todos los datos se registran para distintas condiciones de operación, con el fin de conocer cual resulta más interesante, para ellos se establece una matriz de ensayos que marca cada punto de operación.

En este apartado se recogen los métodos utilizados para obtener y procesar los datos de las imágenes realizadas, así como esa matriz de ensayos que se ha definido previamente.

4.2. Matriz de ensayos y procedimiento experimental

Los experimentos se han realizado en distintos puntos de operación, con distintas condiciones, todos ellos han sido seleccionados para asemejarlos a condiciones de funcionamiento de motores reales. Estos puntos se recogen en cinco condiciones generales, véase LT (Baja Temperatura o Low Temperature), MT (Temperatura Media o Medium Temperature), LD (Baja densidad o Low Density), NO (Operación Nominal o Nominal Operation) y SA (Spray A ECN). Cada uno de estos puntos lleva asociada una temperatura y una densidad, de las cuales se obtienen el resto de condiciones, a excepción de las presiones de inyección, que serán de 500, 1000 y 1500 bares para cada condición.

Condición	LT	MT	LD	NO	SA
Temperatura [K]	780	830	870	870	900
Presión [bar]	50.99	54.25	37.91	56.87	58.83
Densidad [kg/m ³]	22.8	22.8	15.2	22.8	22.8
Presión de inyección [bar]	500	500	500	500	500
	1000	1000	1000	1000	1000
	1500	1500	1500	1500	1500

Para determinar las condiciones que se buscan en el interior del motor se necesitarán las de admisión, y para ello se realizó previamente una caracterización, en la que se pueden obtener las condiciones termodinámicas a través de la presión medida en el cilindro, la primera ley de la termodinámica, la transferencia de calor y el estrés mecánico del motor, así como considerando el soplado.

4.3. Técnicas de visualización en MCIA – Técnicas ópticas

Como ya se ha visto, en función de los datos que se quieran obtener de un ensayo, se aplican unas técnicas ópticas u otras. Cada una de estas requiere de un montaje característico, donde además de varios modelos de cámaras se utilizan lentes, difusores y fuentes de luz de distintos tipos.

La configuración final dependerá además del tipo de ensayo a realizar de los accesos ópticos del motor, teniendo en el caso de este trabajo tres ventanas. En el caso de que el número de accesos disponibles sea menor que el necesario podrían utilizarse *splitters* para duplicar la imagen en distintos ejes.

Un detalle que siempre se realiza al realizar ensayos con técnicas ópticas es la focalización de la cámara, para conseguir una correcta adquisición de imágenes, esto se realiza capturando imágenes de algún objeto en el plano del inyector. Estas imágenes son aprovechadas a su vez para obtener la relación pixel/mm, muy útil en el procesado de datos. Para ello el objeto que se introduce será una cuadrícula en papel que permita conocer en la imagen el valor de cierta medida, generalmente un milímetro. Este procedimiento se realiza para todas las cámaras que se utilicen, pues cada una lleva asociada su unidad de pixel/mm, en los casos de la Figura 4.1 se utilizan para la cámara Photron y Andor utilizadas.

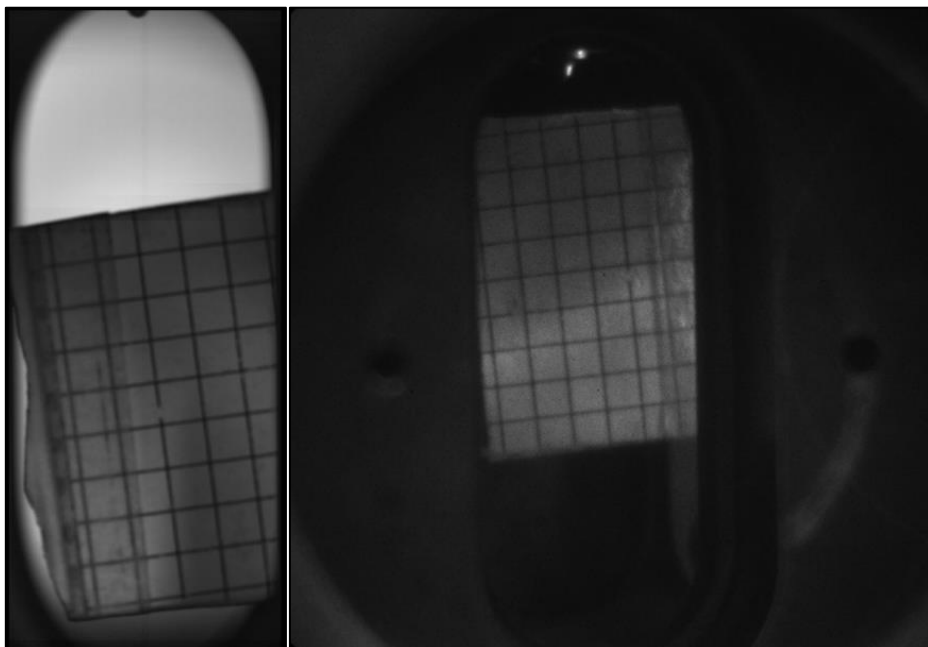


Figura 4.1 Imágenes obtenidas para el enfocado de las cámaras y el cálculo del Pixel/mm.

4.3.1. Extinción de hollín

Las técnicas de extinción de hollín o *Light Extinction Imaging* (LEI) se basan, como ya es sabido, en la atenuación que sufre la intensidad de una fuente de luz al atravesar una nube. Gracias a esta técnica se puede medir la concentración de hollín presente en una llama.

No obstante cuando se trabaja como una llama hay que tener en cuenta el aporte de intensidad que esta genera al captar las imágenes. Por tanto se debe que esta intensidad de la llama para poder desestimarla. Una buena forma de cuantificarla es realizar una medida sin ningún aporte de luz externo, pues de esta forma toda la intensidad capturada es la propia de la llama. Por otra parte la técnica requiere de medidas con una fuente de luz para medir la extinción del hollín, es decir requerimos de datos adquiridos con y sin luz, algo que es imposible conseguir simultáneamente. La solución que se adopta es pulsar la fuente de luz a la mitad de la frecuencia de adquisición de la cámara, para ello se requiere una fuente de luz LED.

Para realizar las medidas de extinción de hollín se utiliza por tanto una cámara rápida, que permita ver la evolución de la llama en diversos instantes y también un led como fuente de luz, que permita un encendido y apagado rápido para seguir de este modo el ritmo marcado por la cámara. Este montaje se prepara como se detalla en la Figura 4.2, teniendo la cámara y el led en ventanas opuestas.

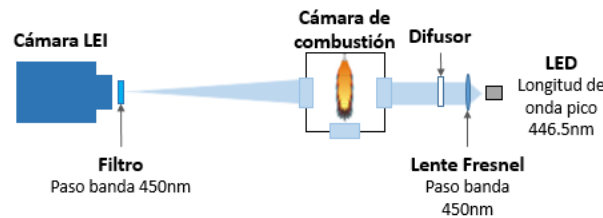


Figura 4.2 Esquema del montaje óptico para LEI

El montaje puede ser dividido en dos partes, una de iluminación y transmisión de luz y otra de recolección y adquisición de luz. En cuanto a la parte de iluminación, se utiliza como fuente de luz un led de alta intensidad con una longitud de onda pico de 446.5nm, que es colimada mediante una lente de 7mm de distancia focal. Seguidamente el difusor genera un campo circular de intensidad Lambertina de 100mm. Una luz difusa permite evitar efectos de *beam steering* (desviación de haz) que generaría una imagen con pequeños efectos de *Shadowgraphy*, en la que las zonas negras podrían deberse a tal efecto. Respecto a la parte de adquisición de datos, la luz que ha atravesado la cámara de combustión es recogida, correctamente focalizada, en la cámara LEI, habiendo pasado antes por un filtro con un paso de banda de 450nm

4.3.2. Lift off length

La longitud de despegue de llama, más conocida como *Lift-off* (LOL), es, como ya se ha definido, la distancia entre el inyector y el inicio de la zona de reacción. Su estudio se puede realizar mediante la medida de las emisiones de quimioluminiscencia del radical OH^* . Como las emisiones del OH^* son de tipo ultravioleta, es decir, que están fuera del espectro visible, no se puede utilizar cualquier cámara, se requiere una intensificada que pueda registrar dicha información. El montaje, mucho más simple que en el caso del LEI, solo requiere de la cámara y un filtro, que permita registrar únicamente el OH^* , quedando el esquema como se ve en la FIGURA.

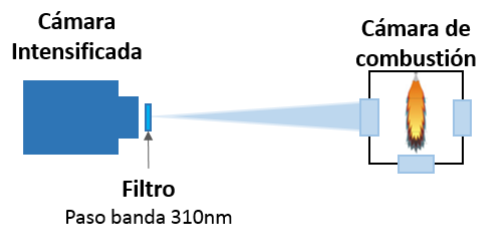


Figura 4.3 Esquema del montaje óptico para la medida del OH^*

Al requerir el LEI dos accesos al motor en el mismo eje, se utiliza el restante para la cámara intensificada. De esta forma quedan completas las tres ventanas y se utilizan los montajes ya descritos para cada técnica.

4.4. Procesado de imágenes

La adquisición de imágenes se realiza con el software propio de cada cámara, que registra toda la información en diferentes archivos. En el caso de las imágenes DBI el programa de adquisición genera un archivo por cada caso de estudio, generando unas matrices de varias dimensiones que contienen toda la información. Por otra parte en los archivos de la cámara intensificada, con mucha menos información, se generara una imagen por cada repetición únicamente. Para ambos casos se tienen matrices de datos, por lo que el uso del programa Matlab, permite procesar las imágenes utilizando diferentes códigos de procesado.

4.4.1. Obtención del factor KL “Optical thickness”

Para obtener el factor KL referido a la concentración de hollín en la llama se utiliza un código de procesado en Matlab. Este código analiza las 30 repeticiones que tiene cada caso, obteniendo los valores medios de cada uno. Para ello como primer paso se tiene una detección de la combustión, sabiendo que esta generara una intensidad máxima en la imagen que deberá ser mayor de una referencia dada, de esta forma se pueden conocer las repeticiones en las que esta técnica no detecta el encendido. Seguidamente se procede a eliminar la intensidad propia de la llama que es recogida por la cámara, debido a que las imágenes con y sin led no pueden ser obtenidas al mismo instante, se obtiene mediante interpolación la intensidad que aproximadamente se tiene en los instantes de las imágenes led, a partir de las imágenes sin led intercaladas, como se observa en la figura 4.4.

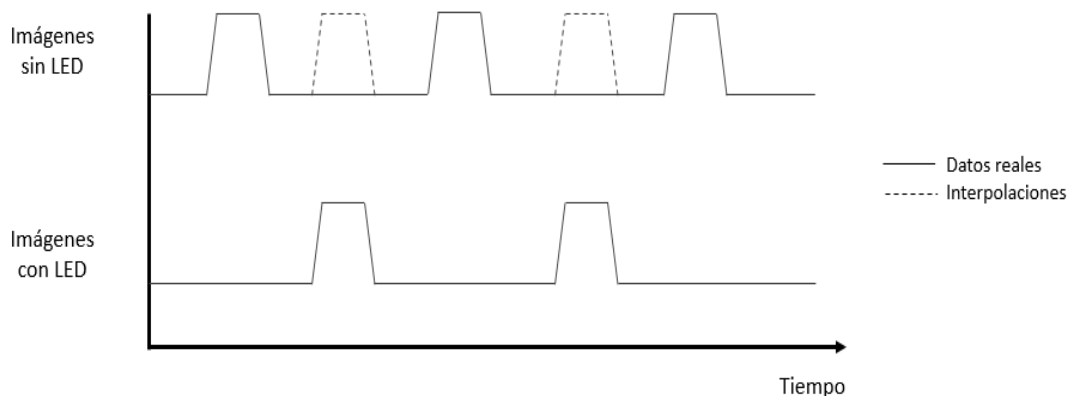


Figura 4.4 Gráfico temporal de la adquisición de imágenes y la interpolación de las mismas para el procesado.

4. Metodología experimental

La intensidad en una imagen se traduce en un nivel digital para cada pixel y, tiene una escala entre 0 (completamente oscuro) y 2^{bit} (en la cámara Photron utilizada $2^{12}=4096$). Esto permite obtener los resultados en función de cada pixel de la imagen. Se calcula por tanto el factor KL para cada pixel, algo que permite además de obtener una medida absoluta, un mapa de distribución de hollín de cada llama. Para el cálculo se requiere la intensidad de cada instante I , la intensidad de esa llama obtenida con la interpolación I_f y la intensidad de referencia inicial I_0 , mediante:

$$\frac{I - I_f}{I_0} = \exp(-KL)$$

Por último, se guardan los datos de KL, datos que son, como ya se ha comentado, mapas de distribución de la concentración de hollín, como en la Figura 4.5. También se puede obtener la información de todos los pixeles, así como graficar el factor KL en función de la posición en el eje del inyector.

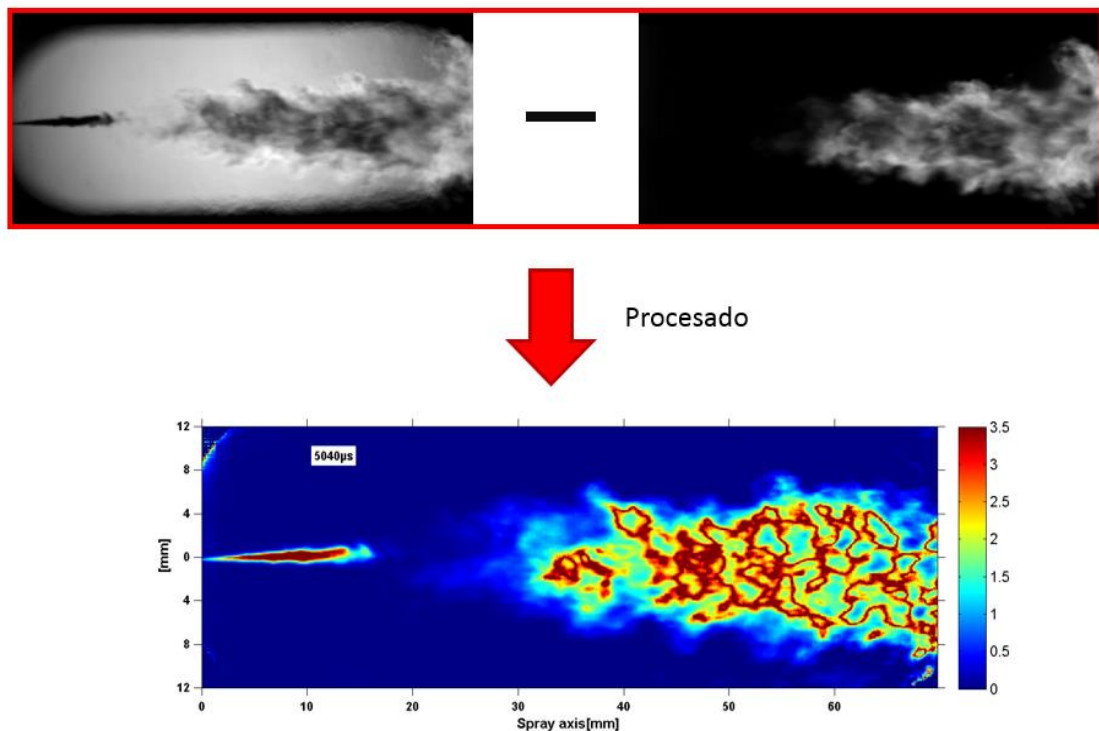


Figura 4.5 Esquema del procesado de LEI para la obtención de mapas del factor KL a partir de imágenes con y sin led.

Las imágenes obtenidas mediante ensayos experimentales permiten obtener un mapa del factor KL en función de cada instante, estos mapas pueden ser de cada repetición así como de la media de todas.

4.4.2. Obtención del *Lift off length*

La detección del *Lift-off* se realiza mediante la medida del OH^* , ya que este es precursor de la combustión, por lo que aparece antes incluso de la llama, además resulta fácil su medida. Como idea general el *Lift-off* viene definido por la aparición de un aumento de la intensidad en el eje del inyector.

Las imágenes de OH^* obtenidas presentan un fondo negro, en el que no se observa nada y zonas de mayor intensidad, propias de la presencia del radical medido. Estas imágenes se traducen en medidas de intensidad por pixel, y aunque las zonas pueden parecer delimitadas existe ruido en toda la imagen, que puede complicar el procesado.

El algoritmo de medida puede funcionar en distintas configuraciones, todas ellas basadas en algoritmos de delimitación de áreas. La escogida para este trabajo mide la intensidad en el eje, y establece una pendiente entre un punto máximo y mínimo para marcar el inicio de la combustión cuando esta es mayor de un 10%. El cálculo es realizado a ambas partes del eje, obteniendo el valor medio de estos, de esta forma, se evitan posibles errores por el desplazamiento del eje. No obstante la emisión típica del radical en llamas suele ser simétrica respecto al eje de inyección.

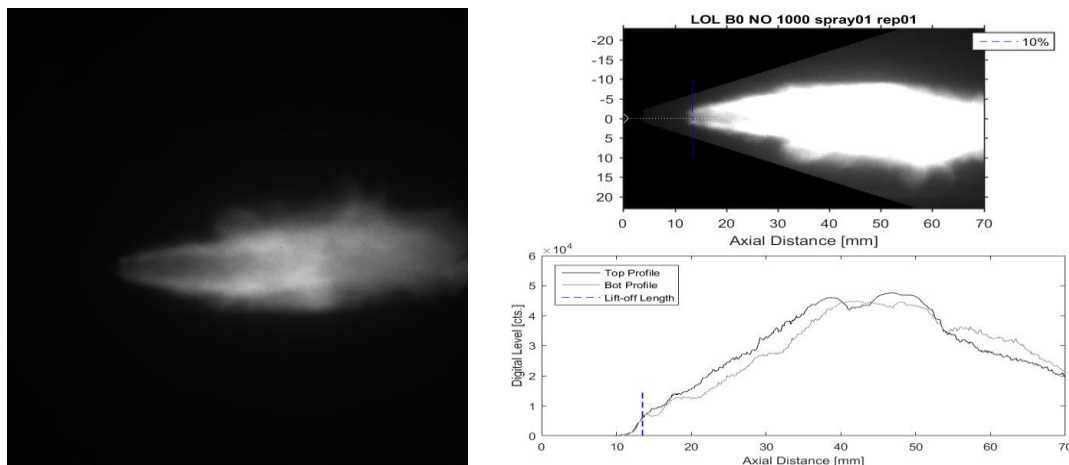


Figura 4.6 Ejemplo del resultado del procesado para la obtención del *Lift-off* a partir de una imagen original de OH^* .

Aunque otras configuraciones consiguen resultados más fiables o más rápidos, esta permite obtener resultados muy fiables para este tipo de imágenes, con poco ruido y áreas bien delimitadas, con poco requerimiento de potencia de cálculo. Se obtiene un resultado en forma de imagen con el de la Figura 4.6.

5. RESULTADOS

5.1. Introducción

Durante los últimos años, las investigaciones mediante técnicas ópticas han estado a la orden del día, por ello, las medidas de concentración de hollín, *lift-off* y la liberación de calor del diésel han sido analizadas en numerosas ocasiones. No obstante, en este trabajo se procede a su estudio para establecer un punto de referencia que permite a su vez comprobar el correcto funcionamiento de los ensayos.

Una vez se establece el comportamiento del diésel, se observan los mismos parámetros para las distintas mezclas de combustibles, pudiendo así al final establecer diferencias claras con el combustible de referencia y presentar las posibles mejoras o los inconvenientes que puede provocar el uso de tales mezclas.

Los datos que se obtienen de cada ensayo, son fundamentalmente secuencias de imágenes de dos tipos, las medidas de OH* y las de LEI. En el primer caso, se tiene una imagen por repetición, mientras que en el segundo se tienen 250 por cada repetición, formando una serie de imágenes que permiten analizar el comportamiento de la llama en toda la franja temporal de la misma.

Se presentan, por tanto, los resultados correspondientes a los estudios realizados en este trabajo, describiendo y justificando lo mismos. Esto se estructura mediante el análisis de diferentes características para cada combustible y finalmente su comparación.

5.2. Combustión de spray diésel de inyección directa

5.2.1. Generación de hollín

La combustión diésel mediante un chorro único de inyección directa presenta, por lo general, una gran presencia de hollín, algo que se observa en la Figura 5.1, donde aparece concentración de hollín desde los primeros instantes de la inyección.

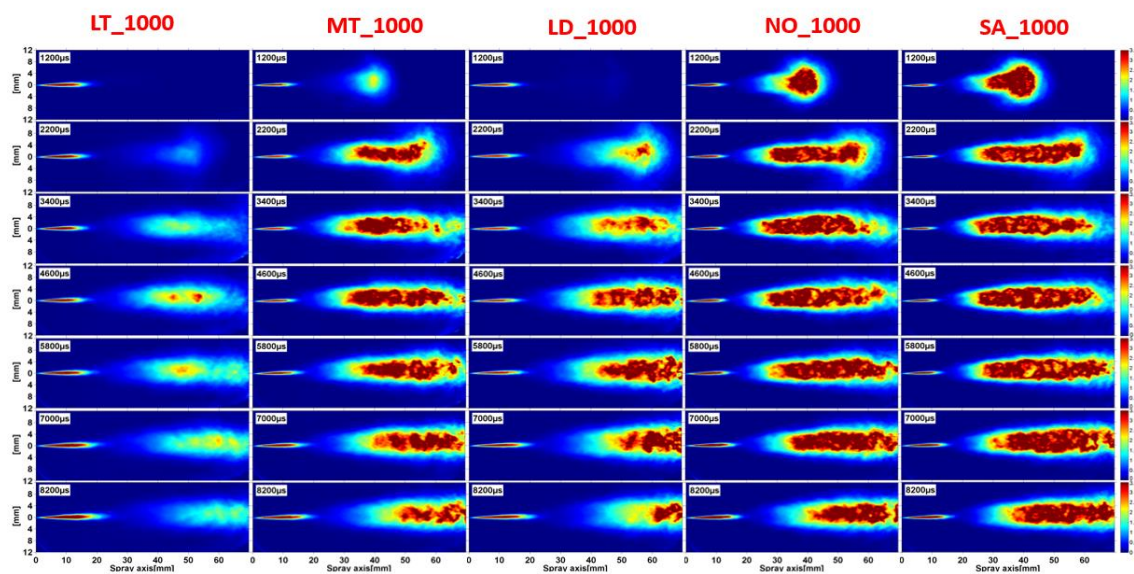


Figura 5.1 Matriz de mapas KL de sprays generados por la inyección a 1000 bar de diésel B0 en distintos instantes para las condiciones de la matriz de ensayos.

Se puede observar un aumento del hollín con la temperatura, acompañado de un autoencendido más temprano. Estas situaciones son dadas en las condiciones NO y SA en las que, desde los primeros instantes se produce la combustión, algo que tarda más tiempo en el caso de condiciones de baja temperatura y densidad, como LT y LD. Cabe destacar la similitud de la forma del spray experimental con el modelo planteado por Dec, sobre todo en los primeros instantes del proceso de combustión.

Se destacan dos zonas de extinción que son más claras en el factor KL sobre el eje de inyección visto en la Figura 5.2. Estas zonas corresponden a una primera parte de inyección líquida, en la que la extinción es producida por la presencia de combustible y la zona de hollín, cuya extinción ya ha sido definida. Se puede observar como el pico de extinción en 1200µs se sitúa cerca del inyector; es por tanto, propio de la inyección líquida de combustible. Por el contrario, para 4600µs y 8200µs, los picos de extinción pertenecerán a la generación de hollín, una zona que está situada más lejos de la inyección.

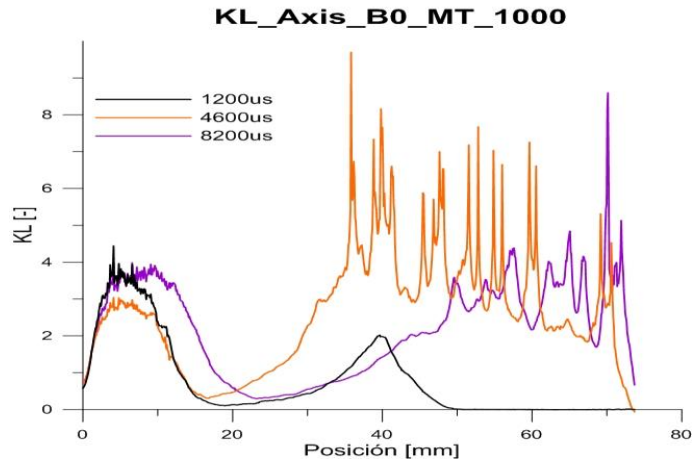


Figura 5.2 Gráfica de la variación del factor KL en función de la posición en el eje de inyección en varios instantes.

También resulta de interés conocer el efecto de la presión de inyección sobre la generación de hollín, que disminuye al aumentar esta presión debido a varios factores. Como concepto general, se produce una disminución del tiempo de residencia del spray con el aumento de temperatura, algo que supone que hay menos tiempo para la formación de mezcla y su posterior oxidación. En la figura, se puede observar la diferencia que supone el aumento de la presión de inyección que genera menos masa de hollín en el interior del spray. En las gráficas, referidas a la evolución del factor KL sobre el eje de inyección para las tres presiones dadas, se perciben los valores mayores de KL para la presión de 500, algo muy destacado en las imágenes.

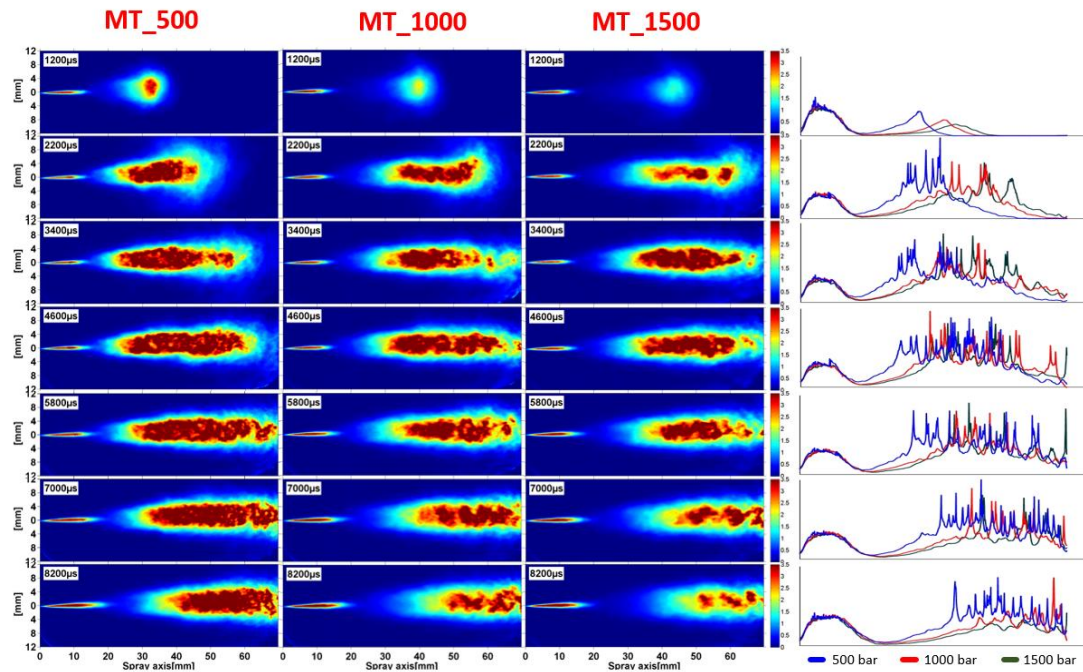


Figura 5.3 Mapas del factor KL para el diésel B0 y tres presiones de inyección, para la condición de media temperatura. Gráficas de la variación del factor KL en función de la posición en el eje de inyección, para las tres presiones de inyección.

Por otra parte, las imágenes obtenidas mediante LEI permiten analizar, a groso modo, el comportamiento del *lift-off*. Mediante las gráficas de variación del factor KL respecto el eje de inyección, es fácilmente reconocible el adelanto o retraso de la distancia de despegue de llama en función de cada condición de presión; no obstante, esto se analiza en el siguiente punto mediante una técnica más adecuada.

5.2.2. Lift off length

El *lift-off* es de gran importancia para la generación de hollín pues de ella depende la cantidad de aire que se engloba en el spray, de esta forma cuanto mayor sea la presencia de aire en el chorro, menor será el dosado realtivo local, consiguiendo una temperatura de combustión de llama también menor. Uno de los principales parametros de control del distancia de despegue de llama es la presión de inyección. Esto se ha podido observar en apartados anteriores, ya que esta distancia aumenta con la velocidad de inyección, lo que se traduce en menores concentraciones de hollín para altas presiones. Véase Figura 5.4.

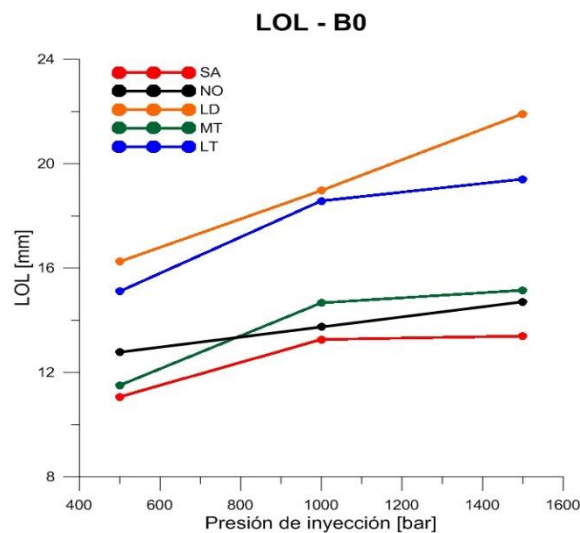


Figura 5.4 Valores de Lift-off de diésel B0 para cada condición de la matriz de ensayos y las tres presiones de inyección dadas.

Así, se sabe que la distancia de despegue de llama depende fundamentalmente de la presión de inyección y de las condiciones de la cámara de combustión. En el caso de las condiciones en el interior del cilindro se observa que bajas temperaturas y baja desidad se tienen *lift-off* mayores, como se observa en la figura.

5.3. Combustión de las mezclas

5.3.1. Misfire

Como ya es sabido un motor de encendido por compresión requiere de un combustible con buenas propiedades de autoencendido como el diésel. No obstante, en este trabajo se trabajan con mezclas en las que se va aumentando la proporción de gasolina, un combustible que precisamente busca evitar ese autoencendido y que no podría trabajar en un MEC.

Por ello, la probabilidad de fallo de encendido aumenta con la proporción de gasolina que se trabaja. En el caso de utilizar mezclas pobres en gasolina la presencia de diésel permite el encendido pues, este inicia la combustión, que después quemara ambos combustibles. Por otra parte, si se inyectan mezclas con una baja concentración de diésel, este no podrá iniciar la combustión, especialmente si las condiciones termodinámicas no son apropiadas; se tiene por tanto un fallo de encendido o *misfire*.

Mediante los datos obtenidos se puede identificar el inicio de la combustión, o su defecto, mediante tres procedimientos. Por una parte, las imágenes obtenidas mediante las cámaras LEI detectan la presencia de llama. Sin embargo, mediante estos datos no se asegura la ausencia de combustión, pues puede darse esta sin presencia de hollín, algo que no se detectaría mediante LEI. En muchos casos la detección de OH* resulta más precisa, pues al ser un precursor de la combustión detecta zonas de combustión que aún no se ha iniciado. Tenemos por tanto las siguientes condiciones en las que no se produce ninguna combustión, y quedan por tanto fuera de análisis:

Casos	LEI	OH*
3070_LT_500	X	X
3070_LT_1000	X	X
3070_LT_1500	X	X
3070_LD_500	X	
3070_LD_1000	X	X
3070_LD_1500	X	X

Se debe destacar el caso 3070_LD_500, en el que los datos LEI nos indicaban que no se había producido combustión, mientras que la medida de OH* nos indicaba la aparición de este radical, dándonos un valor de *Lift-off* de 75.87 mm, algo que indica que, en cierta zona, muy alejada de la inyección, ha habido un amago de autoencendido, pero sin llegar a producir una combustión de interés real. En términos físicos se produce el quemado de la parte premezclada de la llama en forma de pequeños *kernel*s, que al ser tan inestable solo quema la premezcla formada, desapareciendo rápidamente sin llegar a una fase de difusión. Por otra parte, se tienen condiciones en las que sí que se produce combustión en alguna repetición, aunque no en todas. Por tanto se tendrá cierta probabilidad de fallo de encendido.

Es este *misfire*, el que marca el límite de concentración de gasolina en las mezclas y se opta por llegar hasta un 70% porque a mayores proporciones la cantidad de fallos de encendido dificulta mucho su estudio en un MEC.

5.3.2. Generación de hollín

Cuando se habla de la producción de hollín en una llama diésel convencional su comportamiento es, por lo general, ya conocido. No obstante, el objeto de estudio de este trabajo es el caracterizado de sprays de mezclas, el interés reside en la menor producción de hollín que se consigue al trabajar con mezclas con gasolina. Se realizan por tanto 3 tipos de mezclas, con un 30, un 50 y un 70 por ciento de gasolina.

La matriz de ensayos para la mezcla de combustible de 3070 con una inyección de 1000 bares en varios instantes se observa en la Figura 5.5. Destaca en ella la generación de hollín ya descrita de las condiciones con altas temperaturas (NO y SA), mientras que cuando se trabajan en condiciones de baja temperatura o baja densidad la producción de hollín es mucho más baja. La parte de diésel sigue siendo predominante, por lo que el comportamiento sigue siendo muy similar, aunque la generación de hollín disminuye en cierta manera.

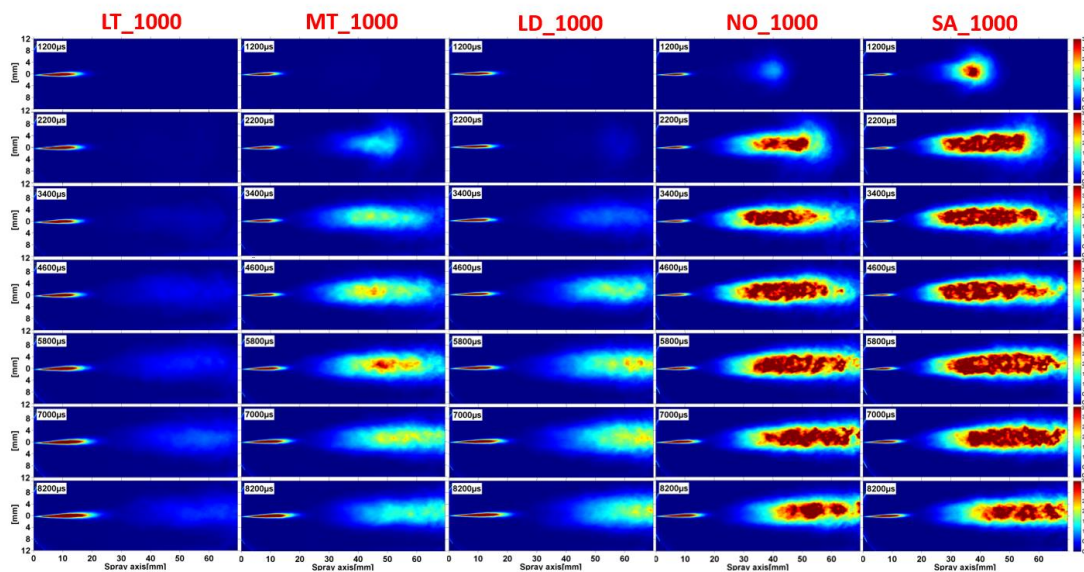


Figura 5.5 Matriz de mapas KL de sprays generados por la inyección a 1000 bar de un chorro de 30% de gasolina y 70% diésel en distintos instantes para las condiciones de la matriz de ensayos.

Todos los sprays después de una fase inicial en la que adquieren la forma propuesta por Dec pasan a una fase de estabilización, en la que la llama de difusión contiene todo el depósito de hollín, que es oxidado al llegar al frente de llama. Además, desde el inicio se mantiene la zona con el combustible en fase líquida que alimenta la combustión.

Por otra parte también se tiene la matriz de la mezcla 5050 (Figura 5.6) en la que los comportamientos son similares, como pero menos visibles debido a la reducción de presencia de hollín por el aumento de la proporción de gasolina. Las condiciones de baja temperatura y baja densidad tienen, para todas las mezclas, un destacado retraso respecto a la generación de hollín, algo justificado también al obtener el valor de despegue de llama que se han dado en ambas condiciones.

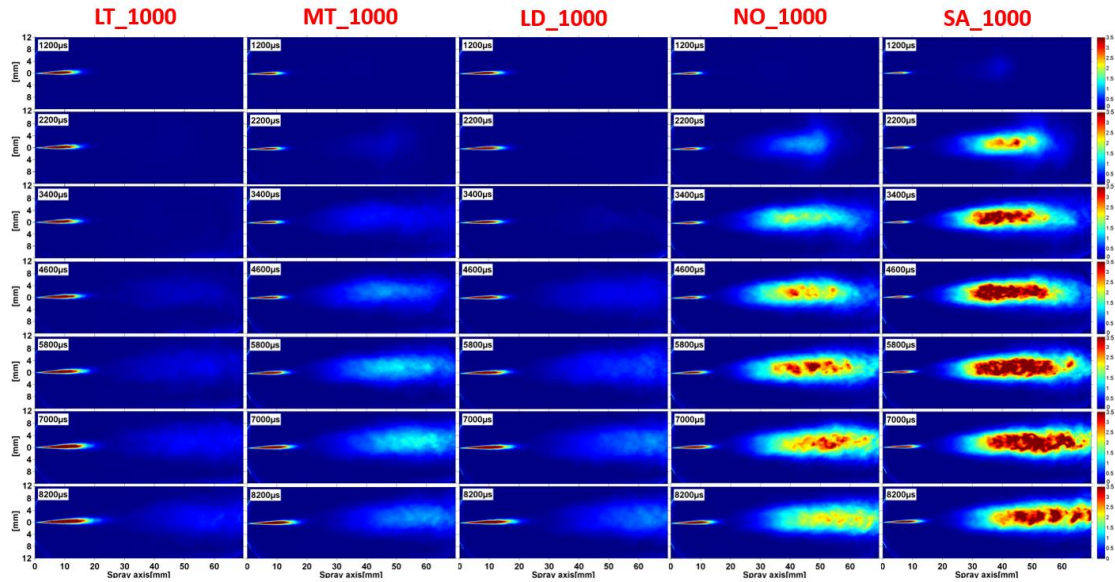


Figura 5.6 Matriz de mapas KL de sprays generados por la inyección a 1000 bar de un chorro de 50% de gasolina y 50% diésel en distintos instantes para las condiciones de la matriz de ensayos.

Como ya se ha nombrado algunas condiciones termodinámicas no cumplen los requisitos físicos para iniciar el autoencendido de la llama, sobre todo cuando se utilizan combustibles pobres en gasóleo, que es el que inicia la combustión. Esto pasa en la última mezcla utilizada en los ensayos, en la que la presencia mayoritaria de combustible con resistencia al autoencendido impide la combustión en las condiciones de baja temperatura y baja densidad, de forma que el spray solo quema en condiciones de temperaturas altas y medias.

Es muy obvia la baja concentración de hollín que presentan estos chorros, llegando en algunas condiciones, como las de MT, a ser prácticamente imperceptible para las cámaras, lo que no quiere decir que no exista la llama, si no que esta llama está formada en su gran mayoría por fase de premezcla. Tales condiciones evitan la fase difusiva de llama, esta fase, que es la predominante en el quemado del diésel, es la que produce el hollín. Por tanto se observa en la Figura 5.7 esta situación, en la que para varias condiciones las imágenes no muestran nada, y es que no se debe olvidar que tales imágenes son mapas de KL que miden la concentración de KL, no la intensidad de la llama.

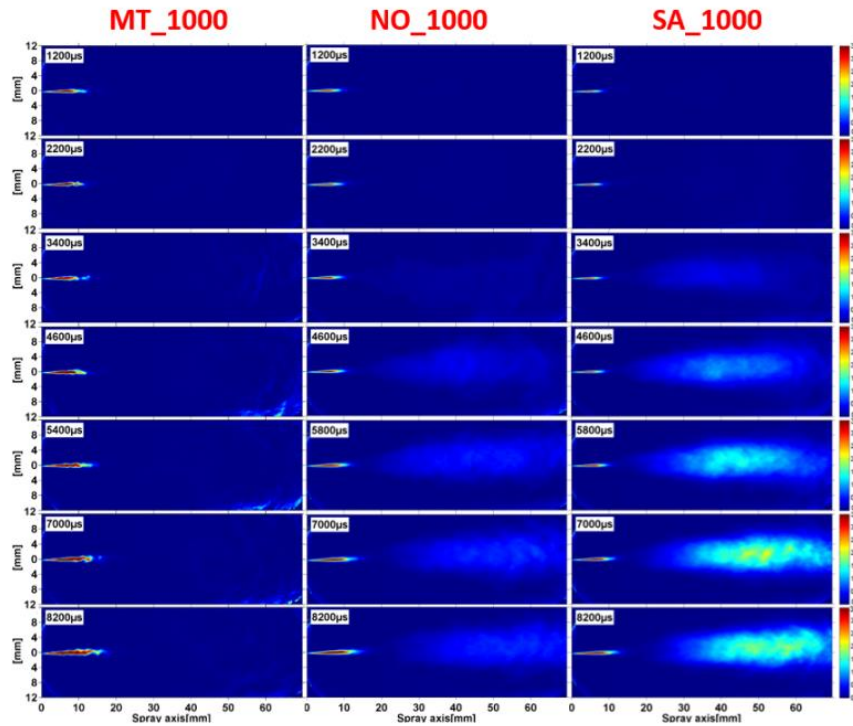


Figura 5.7 Matriz de mapas KL de los sprays, que producen combustión, generados por la inyección a 1000 bar de un chorro de 30% de gasolina y 70% diésel en distintos instantes para las condiciones de la matriz de ensayos.

Se ha podido observar mediante las técnicas LEI la concentración de hollín en diferentes mezclas de combustible. Independientemente de la concentración de combustibles, se aprecian una tendencia de reducción de hollín con la temperatura y la densidad. Teniendo por tanto concentraciones altas para las condiciones estipuladas NO y SA.

5.3.3. Lift off length

Como ya es sabido el *lift-off* depende de muchos parámetros, pero a los más relevantes antes definidos, se le añade ahora la concentración de cada combustible en la mezcla que se inyecta.

Por tanto se obtienen varias distancias de despegue de llama para cada mezcla, véase en las Figuras 5.8, 5.9 y 5.10. No obstante el comportamiento de esta distancia sigue siempre una tendencia similar en cuanto a las condiciones del cilindro se refieren, pues la variación del *lift-off* con la temperatura es casi despreciable, a no ser que se tengan mayores concentraciones de gasolina. Siempre se conseguirán por tanto *lift-off* mayores para temperaturas bajas, así como para condiciones de baja densidad como LD.

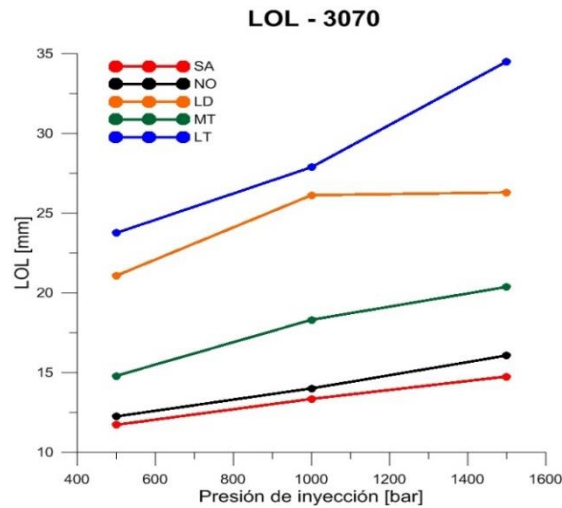


Figura 5.8 Valores de Lift-off de una mezcla de 30% de gasolina y 70% diesel para cada condición de la matriz de ensayos y las tres presiones de inyección dadas.

Para todas las mezclas se aprecia también una gran similitud entre las condiciones con más alta temperatura, nominal y spray, que siempre provocan distancias de despegue de llama muy bajas y siempre muy cercanas para las mismas presiones de inyección.

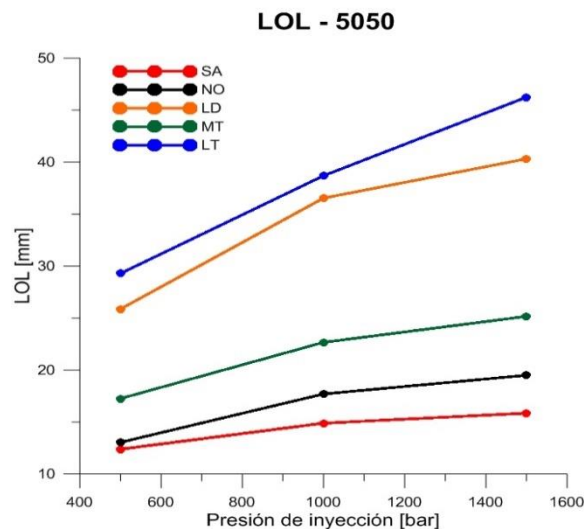


Figura 5.9 Valores de Lift-off de una mezcla de 50% de gasolina y 50% diésel para cada condición de la matriz de ensayos y las tres presiones de inyección dadas.

Se presta especial atención a la última mezcla, con un 70% de gasolina y un 30% de diésel (Figura 5.10), ya que la alta concentración de la primera dificulta, como ya se ha comentado, el autoencendido, y se tienen por tanto varios casos de *misfire*. El análisis del OH* recoge la presencia de este radical en el cilindro, pero esta no siempre lleva asociada una combustión real, detectándose en algunas repeticiones longitudes de *lift-off* de más de 70 mm, valores realmente anómalos, como en el caso de LD_500, en el que se detecta cierto *lift-off* pero se sabe que no hay presencia real de llama.

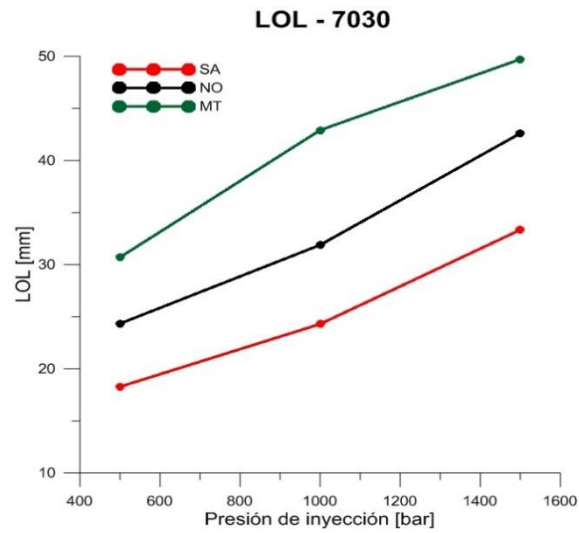


Figura 5.10 Valores de Lift-off de una mezcla de 70% de gasolina y 30% diesel para cada condición de la matriz de ensayos y las tres presiones de inyección dadas.

La influencia del tipo de mezcla a utilizar es por tanto realmente notable en el *lift off length* de cada condición, marcando junto con las condiciones del cilindro y las presiones de inyección, el comportamiento de los sprays en combustión a estudio.

5.4. Análisis del efecto de las mezclas

5.4.1. Misfire

Se ha podido observar la baja generación de hollín que presentan las mezclas ricas en gasolina, no obstante, es sabido el gran problema que estas pueden generar debido a la presencia de *misfire*. El fallo de encendido, a parte del problema obvio que implica la falta de potencia, supone la aparición de hidrocarburos sin quemar en el escape, algo que conlleva una mayor polución.

En la Figura 5.11 se analiza la presencia de *misfire* en porcentaje para los combustibles en los que no se produce siempre la combustión en cada condición, agrupando todas las presiones de inyección. De esta forma se observa la evolución del fallo de encendido en función de las proporciones.

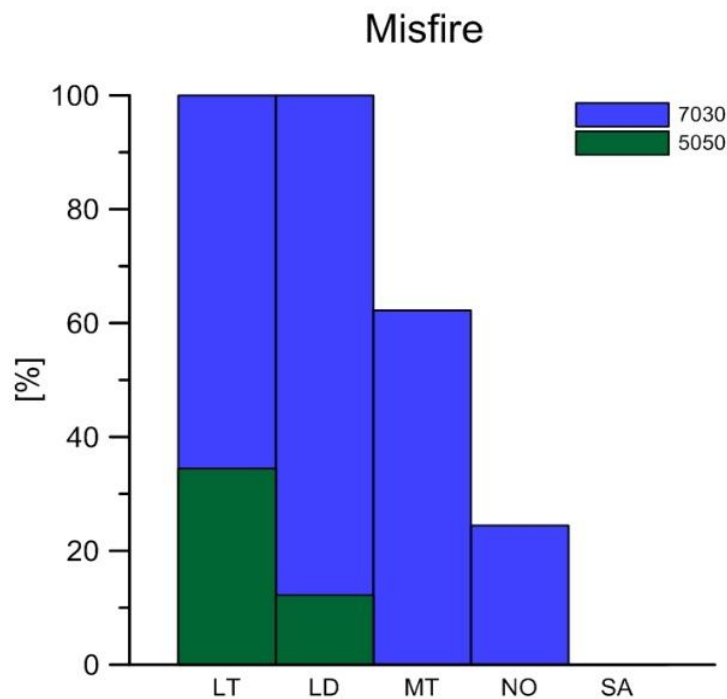


Figura 5.11 Presencia de *misfire* en las mezclas 7030 y 5050 para las distintas condiciones, incluyendo las distintas presiones de inyección en cada condición.

Las condiciones LD y LT como ya es sabido no producen ningún tipo de combustión cuando se utiliza la mezcla 7030. Son de interés el resto de condiciones en las que se produce la combustión, aunque no siempre. Para su análisis se debe conocer también el comportamiento de estos casos en función de la presión de inyección, véase la figura.

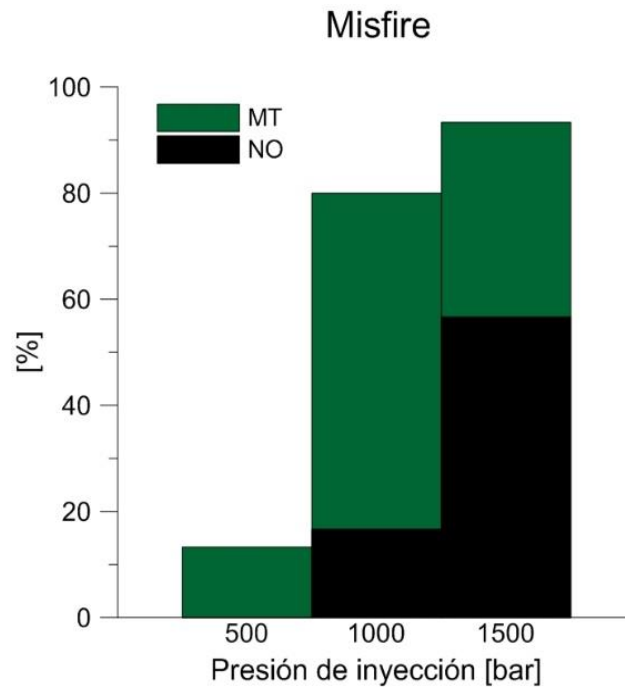


Figura 5.12 Presencia de *misfire* en función de la presión de inyección para las condiciones MT y NO de la mezcla 3070.

Se observa por tanto que para las presiones de inyección más altas existe un mayor fallo de encendido, algo que sustentado por las mayores longitudes de despegue de llama que se presentan en estos casos.

Como idea general, se puede decir que las condiciones de mezcla con menor presencia de diésel presentan problemas en cuanto a *misfire* cuando se trabaja con baja temperatura o baja densidad y que, en los casos de media temperatura y condiciones nominales se pueden evitar tales problemas si la inyección se produce a bajas presiones. Este último concepto se aplica también en los casos LT y LD al trabajar con la mezcla 5050.

Este *misfire* supone por tanto un gran problema, sobre todo para el control de este tipo de combustiones, siendo esta una de las tareas pendientes de cara al futuro de la combustión *dual fuel*.

5.4.2. Generación de hollín

Durante el análisis de cada mezcla utilizada como combustible, se ha apreciado una reducción importante de la generación de hollín, siendo el diésel puro el que mayor concentración presentaba. Para valorar de mejor manera este efecto se presentan los datos de KL en forma de mapa de una misma condición y distintas temperaturas en la Figura 5.13.

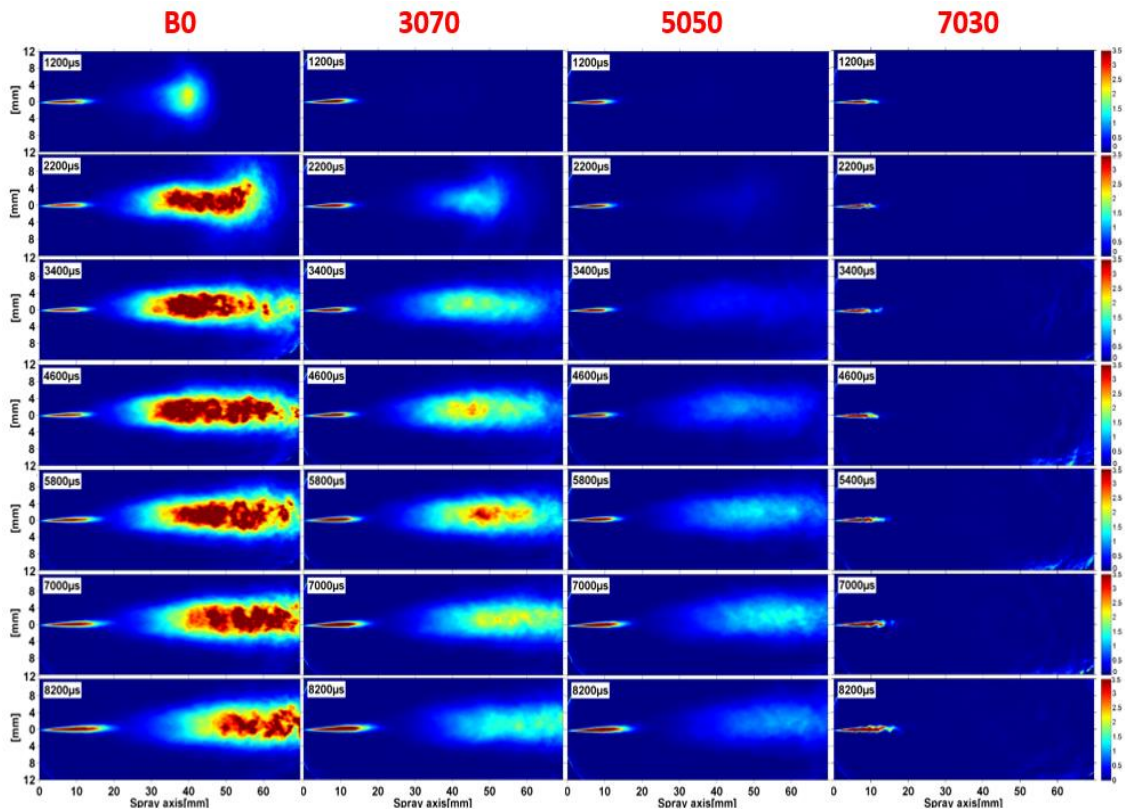


Figura 5.13 Matriz de mapas KL de sprays generados por la inyección a 1000 bar en condiciones MT de un chorro de distintas mezclas de combustibles en distintos instantes.

De este modo se observa fácilmente la reducción de hollín antes comentada. La simple introducción de un porcentaje de gasolina menor al del diésel presenta una mejoría notable, pero es a partir de mezclas con igual masa de ambos combustibles cuando estas se hacen más notables, teniendo una estructura de chorro muy similar a las condiciones de quemado de combustible puro, con la excepción de un cierto aumento de *lift-off*, pero con una presencia mucho menor de hollín, llegando está a ser casi imperceptible al utilizar una mezcla con baja concentración de diésel, como en el caso 7030. Se tiene por tanto una condición de operación en la que se produce la combustión pero no existe la generación de hollín habitualmente asociada a esta. Este factor, ya descrito, se debe a la gran fase premezclada que presentan estas llamas, que consiguen de esta forma evitar fases difusivas. Esas fases son las que presentan la generación de hollín propia de cada llama.

Otra forma de cuantificar de mejor forma esta gran diferencia en la producción de hollín con el uso de las diferentes mezclas es recurrir otra vez a los gráficos que evalúan el comportamiento del factor KL en función de la posición en el eje de inyección, como en la Figura 5.14.

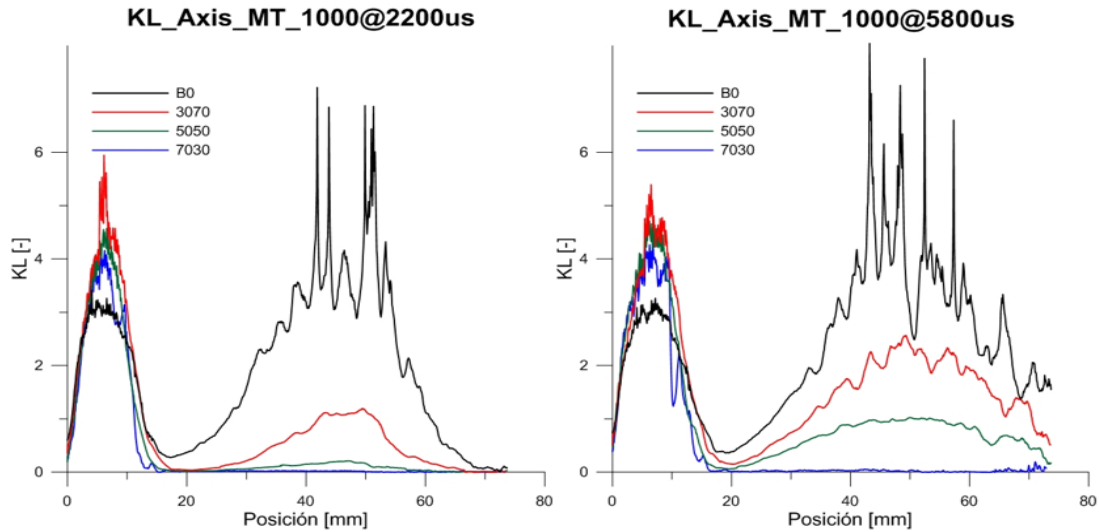


Figura 5.14 Gráfica de la variación del factor KL en función de la posición en el eje de inyección en dos instantes para las diferentes mezclas.

Se aprecia de esta forma como la concentración de hollín se reduce de forma amplia, manteniéndose prácticamente nula para la mezcla 7030, como se ha había comentado. Queda por tanto establecida esa tendencia a la baja en cuanto a la generación de hollín con la adición de gasolina, algo que se conseguido en otros estudios mediante el uso de dos inyectores. De esta forma se puede decir que se mantienen las ventajas de este tipo de mezclas al utilizar una única inyección, reduciendo la complejidad del sistema de inyección.

5.4.3. Variación de Lift off length

Antes de analizar los datos obtenidos se puede suponer cierta tendencia en el comportamiento del *lift-off* al utilizar mezclas, pues teniendo en cuenta que se cambiando la concentración de un combustible cuya tasa de evaporación es mayor, por lo que se tiene más masa premezclada para una misma condición.

Este planteamiento es sustentado por los datos de los ensayos, mostrados una parte de ellos en la Figura 5.15. Se puede comprobar de esta forma que el uso de diésel puro genera unas distancias de despegue de llama menores a las mezclas, siendo este uno de los factores más importantes para justificar la reducción de la generación de hollín anteriormente analizada. El comportamiento del spray en cuanto a lift-off sigue la misma tendencia cuando se analiza una misma condición termodinámica, variando debido a las mezclas y no a las presiones de inyección.

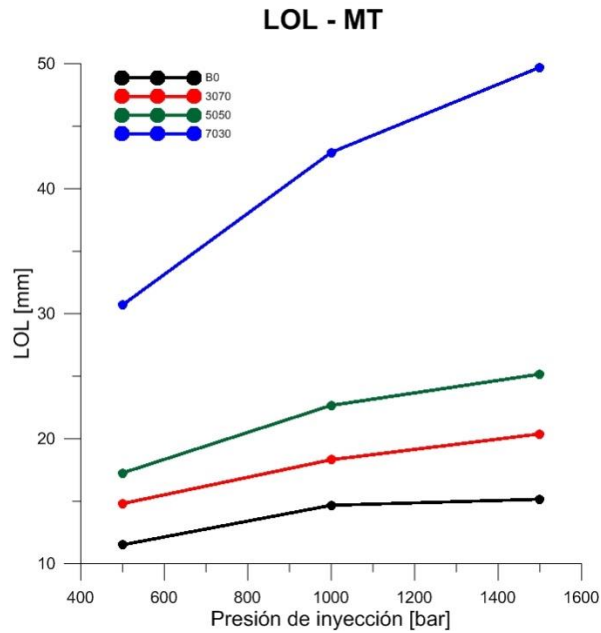


Figura 5.15 Valores de Lift-off de varias mezclas de combustibles para la condición MT y las tres presiones de inyección dadas.

La distancia de despegue de llama viene acompañada de una distancia de penetración líquida, por tanto el aumento antes comentado del *lift-off* al reducir la proporción de diésel lleva asociada esta menor longitud de la fase líquida del combustible, que aumenta al tener la mezcla menos presencia de combustible con mayor tasa de evaporación. Por tanto para una mayor masa evaporada se tendrá menor longitud líquida y como consecuencia, mayor *Lift-off*.

Por tanto quedan establecidas varias condiciones que modifican el comportamiento del *lift-off*. Primeramente la presión de inyección que controla la cantidad de movimiento que se introduce en el chorro, y por consiguiente la cantidad de aire que puede ser englobado en el chorro, así como la distancia que recorre el combustible hasta que se autoenciende. Por otra parte también varía debido a las condiciones del interior del cilindro, que controlan, en el caso de la temperatura, el tiempo de autoencendido, consiguiendo con unas condiciones de baja temperatura que este tiempo sea mayor, y con ello también lo sea la distancia que el chorro recorre antes de la combustión. Cuando se trabaja con condiciones de baja densidad la capacidad de avance del chorro, asociada al *lift-off* también es mayor. Finalmente una de las condiciones que más varía la distancia de despegue de llama es la mezcla, consiguiendo aumentarla al aumentar la cantidad de gasolina en la mezcla.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6. Conclusiones y trabajos futuros

En este proyecto se pretendía realizar una caracterización experimental de los sprays generados por la combustión de distintas mezclas al ser inyectadas en un motor de encendido por compresión. Para ello, se han realizado una serie de ensayos mediante técnicas ópticas con el fin de obtener datos y poder proceder a su análisis.

La combustión de un chorro de diésel ha sido estudiada en numerosas ocasiones, por ello, se utilizan los datos referentes a la misma para establecer un punto de partida. Como ya es sabido, la generación de hollín va asociada a las condiciones en el interior de la cámara de combustión y guarda relación con el *lift-off length* (LOL). Los datos muestran la dependencia directa de la producción de hollín con la temperatura. Por otra parte también se observa que el LOL es mayor para condiciones de baja densidad. Cuanto mayor es la distancia de despegue de llama, menor es la producción de hollín, pues el spray puede englobar más aire en su interior. Esto supone que para mayores presiones de inyección, en las que se consigue mayor LOL, la generación de hollín también se ve reducida.

Por otra parte se ha pretendido analizar el comportamiento de las mezclas observando que las tendencias establecidas para el diésel se mantienen en el caso de usar estas como combustibles. No obstante, cambiarían los valores, siendo las generaciones de hollín menores y las distancias de despegue de llama mayores. Cuando se analizan las mezclas se ha de tener en cuenta un nuevo factor no presente en la combustión del diésel, el fallo de encendido o *misfire*. Este se produce cuando en el interior del cilindro no se cumplen las condiciones necesarias para que un determinado combustible se auto-encienda. Para las mezclas en las que la concentración de diésel, que es el combustible que inicia la combustión, es menor este *misfire* se hace más relevante.

La principal justificación de la gran reducción de hollín que es obtenida al utilizar estas mezclas es el aumento de fase premezclada en las llamas debido al aumento del porcentaje de gasolina. Ya que esta fase de la combustión, a diferencia de la fase difusiva, no presenta generación de hollín.

Finalmente se han establecido las relaciones entre cada combustible utilizado, viendo que la generación de hollín es mayor en el caso del diésel, por lo que el uso de concentraciones mayores de gasolina parece suponer a priori una gran ventaja, así como el uso de condiciones de baja temperatura y densidad. Sin embargo, como ya se ha dicho el uso de menores concentraciones de diésel impide en algunos casos la combustión de la mezcla, con la consiguiente emisión de hidrocarburos sin quemar que ello conlleva, y sobre todo el gran problema de control de la combustión que supone.

Por lo tanto, los datos analizados han permitido comprobar el comportamiento del diésel y de todas las mezclas, así como establecer comparaciones entre ellos. De esta forma se ha visto el potencial que este tipo de mezclas tienen en la reducción de emisiones, pero también los posibles efectos adversos que pueden acarrear.

En vista a posibles aplicaciones futuras este estudio ha demostrado el potencial que presenta la utilización de técnicas de combustión basadas en dual fuel, incluso con el uso de un único inyector, que inyecte una proporción prefijada de cada mezcla.

Conociendo las grandes ventajas que implica el uso de estas mezclas y siendo conscientes que su principal desventaja es el posible fallo de encendido estos estudios pueden ser combinados con sistemas de control de combustión. Como principales ejemplos se tienen los sistemas de encendido externo, el dopado en la admisión con gases que favorecen la combustión o ciertos sistemas que fuerzan un determinado movimiento de aire que oriente la formación de la mezcla hacia puntos calientes. Todos ellos buscan conseguir combustiones en condiciones en las que un motor de encendido por compresión no conseguiría el autoencendido. Cuando se habla del forzado del encendido se tienen distintas fuentes de generación de energía para ese encendido, desde la tradicional chispa generada por una bujía hasta nuevas técnicas que suponen el uso de láseres para la generación de plasma en el interior de la cámara de combustión.

7. BIBLIOGRAFÍA

Guardiola, C.; Ruiz, S.; Pla, B.; Blanco-Rodríguez, D. (2014). Motores Térmicos para Ingeniería Mecánica. Editorial Universitat Politècnica de València

F.Payri; J.Desantes (2011). Motores de combustión interna alternativos. Editorial Universitat Politècnica de València

Galindo Lucas, José; Payri Marín, Raúl; Arrègle, Jean; Serrano Cruz, José Ramón; Luján Martínez, José Manuel; Pastor Soriano, José Vicente; Torregrosa Huguet, Antonio José; Broatch Jacobi, Jaime Alberto (2014). Procesos y tecnología de máquinas y motores térmicos. Editorial Universitat Politècnica de València

J. Dec (1997). "A conceptual model of DI Diesel Combustion based on Laser-Sheet Imaging". SAE 970873. Editorial SAE International

Hua Zhao (2012). Laser Diagnostics and optical Measurement Techniques in Internal Combustion Engines. Editorial SAE International

Alberto Palomares Chust (2001). Estudio del proceso de inyección diésel mediante visualización y procesado de imágenes. Editorial Universitat Politècnica de València

G.S. Settles (2001).Schlieren and Shadowgraph Techniques. Editorial Springer

Pinotti, M. (2013). Desarrollo y puesta a punto de un sistema óptimo para el encendido de chorros diésel mediante plasma inducido por láser.

8. PRESUPUESTO

8.1. Introducción

En este apartado se recogen todos los costes asociados a la ejecución de este trabajo de investigación. Para ello se tendrán en cuenta tanto los costes asociados a mano de obra como los asociados a los materiales.

El coste referido a la mano de obra agrupa los costes debidos al trabajo del personal que ha intervenido en la realización de este trabajo. Los datos son obtenidos a partir de los costes presupuestados según el instituto CMT-Motores Térmicos.

Cuando se habla del coste de materiales solo se tiene en cuenta la amortización de los mismos, que supone el coste asociado al tiempo que cada material ha estado inmovilizado debido a su requerimiento para este trabajo, no solo al tiempo de uso.

Finalmente se establece un presupuesto total, que tienen en cuenta los costes indirectos, el beneficio industrial y el IVA.

8.2. Coste de mano de obra

Primeramente, se presentan los costes asociados a mano de obra del proyecto. Para el cálculo de los diferentes salarios se consideran 52 semanas al año, con una disponibilidad de 6 semanas de vacaciones, y siendo la duración de la semana laboral de 40 horas. Se muestra a continuación en desglose de cálculo salarial para cada uno de los puestos de trabajo implicados.

Ingeniero Industrial – Director	
Horas/año [horas]	1840
Salario bruto [€]	112792.00
Precio de hora trabajada [€/hora]	61.30
Ingeniero Industrial – Doctorando del departamento	
Horas/año [horas]	1840
Salario bruto [€]	71208.00
Precio de hora trabajada [€/hora]	38.70
Ingeniero Técnico Industrial – Técnico	
Horas/año [horas]	1840
Salario bruto [€]	50784.00
Precio de hora trabajada [€/hora]	27.60
Ingeniero Técnico Industrial – Becario	
Horas/año [horas]	1840
Salario bruto [€]	27600.00
Precio de hora trabajada [€/hora]	15.00

En base a estos costes se pueden calcular los costes asociados a la mano de obra, que son repartidos para cada tarea principal.

MANO DE OBRA – ENSAYOS			
Operario	Coste Unitario [€/horas]	Cantidad [horas]	Total [€]
Doctorando	38.70	60	2322.00
Técnico	27.60	60	1656.00
Becario	15.00	60	900.00
Coste total Mano de Obra - Ensayos			4878.00

MANO DE OBRA - PROCESADO DE DATOS

Operario	Coste Unitario [€/horas]	Cantidad [horas]	Total [€]
Doctorando	38.70	100	3870.00
Becario	15.00	200	3000.00
Coste total Mano de Obra – Procesado de datos			6870.00

MANO DE OBRA - ANALISIS DE DATOS

Operario	Coste Unitario [€/horas]	Cantidad [horas]	Total [€]
Director	61.30	20	1226.00
Doctorando	38.70	50	1935.00
Becario	15.00	100	1500.00
Coste total Mano de Obra – Análisis de datos			4661.00

Se procede entonces a reunir los costes en un presupuesto total de mano de obra:

PRESUPUESTO - MANO DE OBRA

Concepto	Total [€]
Ensayos	4878.00
Procesado de datos	6870.00
Análisis de datos	4661.00
TOTAL[€]	16409.00

8.3. Coste de material

Seguidamente, se muestran los costes asociados a las instalaciones de las cuales se han obtenidos los datos analizados. Se recogen los costes de la instalación motor maqueta, los equipos auxiliares, los equipos electrónicos e informáticos.

COSTE MATERIAL			
Elemento	Coste Unitario [€/ud]	Cantidad[ud]	Total [€]
Motor Maqueta	246078.00	1	246078.00
Equipos exteriores (Compresores)	160324.00	1	160324.00
Equipos electrónicos (Captadores)	12575.00	1	12575.00
Equipos ópticos			
Conjunto cámara rápida Photron	50000.00	1	50000.00
Conjunto cámara intensificada Andor	35000.00	1	35000.00
Conjunto elementos ópticos	3000.00	1	3000.00
Equipos informáticos y software			
Ordenador	1000.00	2	2000.00
Matlab	2000.00	1	2000.00
Coste total Material			510977.00

Se procede entonces a calcular el precio de la amortización de los costes materiales asociados al proyecto.

COSTE AMORTIZACIÓN MATERIAL				
Elemento	Coste [€]	Vida útil [años]	Periodo amortizado [horas]	Importe [€]
Motor Maqueta	246078.00	10	504	1415.79
Equipos exteriores (Compresores)	160324.00	10	504	922.41
Equipos electrónicos (Captadores)	12575.00	10	504	72.35
Equipos ópticos				
Conjunto cámara rápida Photron	50000.00	10	504	287.67
Conjunto cámara intensificada Andor	35000.00	10	504	201.37
Conjunto elementos ópticos	5000.00	10	504	28.77
Equipos informáticos y software				
Ordenador	1000.00	5	2880	32.88
Matlab	2000.00	1	2880	65.75
Coste total Amortizado				3026.99

8.4. Presupuesto total

A partir de todos los presupuestos parciales obtenidos se puede obtener el coste total de este trabajo:

PRESUPUESTO TOTAL	
Concepto	Total [€]
Mano de obra	16409.00
Materiales	3026.99
Costes indirectos (20% sobre c.directos)	3887.20
Costes de beneficio industrial (20% sobre c.directos)	971.80
IVA (21%)	5101.95
Coste total	29396.94

El coste total del proyecto asciende a **VEINTINUEVE MIL TRESCIENTOS NOVENTA Y SEIS EUROS CON NOVENTA Y CUATRO CÉNTIMOS.**

TABLA DE FIGURAS

Figura 1.1 Normativa europea de emisiones y objetivos de emisiones a nivel mundial	11
Figura 2.1 Mapa de la generación de hollín y NOx en función del dosado relativo (Fr) y la temperatura	17
Figura 2.2 Esquema de la forma y zonas de un chorro diésel definido por Dec.	19
Figura 2.3 Gráficas de tasa de inyección, ratio de calor liberado y presión en el interior del cilindro, en función del ángulo del cigüeñal.	20
Figura 2.4 Gráfica de la presión en función del ángulo del cigüeñal en el que se indican las fases de combustión para un MEP	22
Figura 2.5 Esquema de distintas técnicas ópticas que permiten estudiar las distintas zonas y comportamientos de un spray reactivo.	24
Figura 3.1 Imagen del Motor maqueta	30
Figura 3.2 A) Culata con accesos ópticos B) Ventana de cuarzo	31
Figura 3.3 Esquema de los circuitos de presión y acondicionamiento principales	32
Figura 3.4 Fuente de luz-LED utilizada en los ensayos	34
Figura 3.5 A) Cámara rápida Photron B) Cámara intensificada Andor	35
Figura 4.1 Imágenes obtenidas para el enfocado de las cámaras y el cálculo del Pixel/mm.	41
Figura 4.2 Esquema del montaje óptico para LEI	42
Figura 4.3 Esquema del montaje óptico para la medida del OH*	43
Figura 4.4 Gráfico temporal de la adquisición de imágenes y la interpolación de las mismas para el procesado.	44
Figura 4.5 Esquema del procesado de LEI para la obtención de mapas del factor KL a partir de imágenes con y sin led.	45
Figura 4.6 Ejemplo del resultado del procesado para la obtención del Lift-off a partir de una imagen original de OH*	46
Figura 5.1 Matriz de mapas KL de sprays generados por la inyección a 1000 bar de diésel B0 en distintos instantes para las condiciones de la matriz de ensayos	50
Figura 5.2 Gráfica de la variación del factor KL en función de la posición en el eje de inyección en varios instantes.	51
Figura 5.3 Mapas del factor KL para el diésel B0 y tres presiones de inyección, para la condición de media temperatura. Gráficas de la variación del factor KL en función de la posición en el eje de inyección, para las tres presiones de inyección.	51
Figura 5.4 Valores de Lift-off de diésel B0 para cada condición de la matriz de ensayos y las tres presiones de inyección dadas.	52
Figura 5.5 Matriz de mapas KL de sprays generados por la inyección a 1000 bar de un chorro de 30% de gasolina y 70% diésel en distintos instantes para las condiciones de la matriz de ensayos	54
Figura 5.6 Matriz de mapas KL de sprays generados por la inyección a 1000 bar de un chorro de 50% de gasolina y 50% diésel en distintos instantes para las condiciones de la matriz de ensayos	55

Figura 5.7 Matriz de mapas KL de los sprays, que producen combustión, generados por la inyección a 1000 bar de un chorro de 30% de gasolina y 70% diésel en distintos instantes para las condiciones de la matriz de ensayos.	56
Figura 5.8 Valores de Lift-off de una mezcla de 30% de gasolina y 70% diesel para cada condición de la matriz de ensayos y las tres presiones de inyección dadas.	57
Figura 5.9 Valores de Lift-off de una mezcla de 50% de gasolina y 50% diésel para cada condición de la matriz de ensayos y las tres presiones de inyección dadas.	57
Figura 5.10 Valores de Lift-off de una mezcla de 70% de gasolina y 30% diesel para cada condición de la matriz de ensayos y las tres presiones de inyección dadas.	58
Figura 5.11 Presencia de misfire en las mezclas 7030 y 5050 para las distintas condiciones, incluyendo las distintas presiones de inyección en cada condición.	59
Figura 5.12 Presencia de misfire en función de la presión de inyección para las condiciones MT y NO de la mezcla 3070.	60
Figura 5.13 Matriz de mapas KL de sprays generados por la inyección a 1000 bar en condiciones MT de un chorro de distintas mezclas de combustibles en distintos instantes.	61
Figura 5.14 Gráfica de la variación del factor KL en función de la posición en el eje de inyección en dos instantes para las diferentes mezclas.	62
Figura 5.15 Valores de Lift-off de varias mezclas de combustibles para la condición MT y las tres presiones de inyección dadas.	63

